

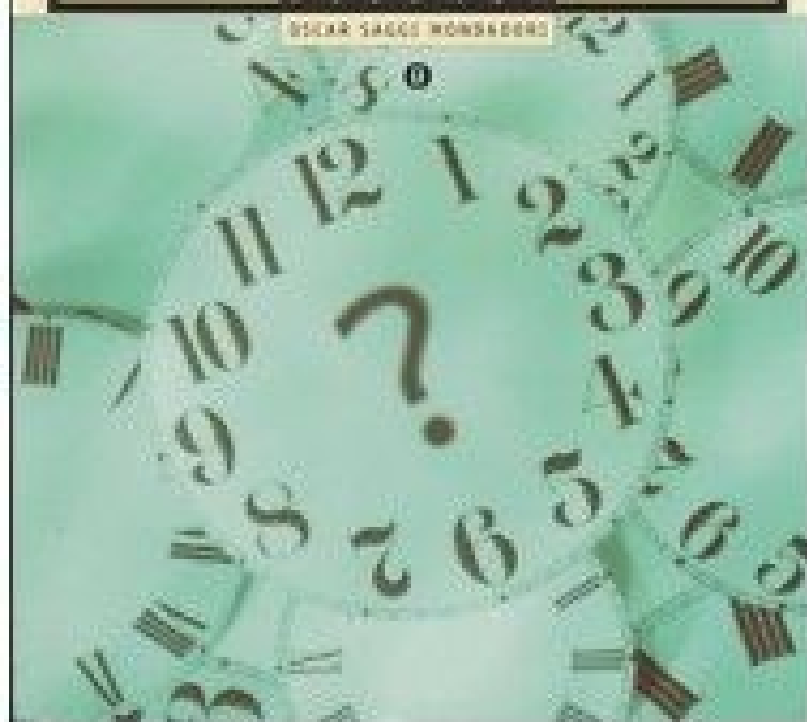
Richard Dawkins

L'OROLOGIAIO CIECO

Creazione o evoluzione?

SCIENTIA

OSCAR SAGEO MONDADORI



Richard Dawkins

L'OROLOGIAIO CIECO

Creazione o evoluzione?

Traduzione di Libero Sosio

OSCAR MONDADORI

Titolo originale dell'opera: The Blind Watchmaker
2001 Arnoldo Mondadori Editore S p A . Milano
1° edizione Oscar scienza gennaio 2003

Indice

Prefazione

1 Spiegare il molto improbabile

2 Progetto razionale

3 L'accumulazione di piccoli mutamenti

4 Scorribande attraverso il mondo animale

5 Il potere e gli archivi

6 Origini e miracoli

7 Evoluzione costruttiva

8 Esplosioni e spirali

9 Puntualizzazione sul puntuazionismo

10 L'unico vero albero della vita

11 Rivali condannate

Bibliografia

Indice analitico e rinvii bibliografici

Prefazione

Questo libro è stato scritto nella convinzione che la nostra esistenza fosse un tempo il massimo fra tutti i misteri, ma che oggi non sia più tale perché l'enigma è stato risolto. Il merito di quest'impresa va riconosciuto a Darwin e a Wallace, anche se noi continueremo per un bel po' di tempo ad aggiungere note in calce alla loro soluzione. Io sono stato indotto a scrivere questo libro dalla sorpresa provata nello scoprire che un numero grandissimo di persone sembravano non rendersi conto non solo dell'esistenza di una soluzione bella ed elegante a questo problema, ma incredibilmente, in molti casi, neppure dell'esistenza di un problema!

Il problema è quello della complessità del «progetto» degli esseri viventi. Il computer su cui sto scrivendo queste parole ha una capacità di memoria di circa 64 kilobyte (un byte viene usato per contenere ciascun carattere del testo). Il computer fu progettato coscientemente e prodotto in conseguenza di una decisione deliberata. Il cervello con cui il lettore sta comprendendo le mie parole è un complesso di circa dieci milioni di kiloneuroni. Molte di queste cellule nervose posseggono ciascuna più di un migliaio di «fili elettrici» che le collegano ad altri neuroni. Inoltre, al livello genetico molecolare ognuna delle più di un miliardo di cellule del corpo contiene una quantità di informazione digitale, codificata con grande precisione, più di mille volte maggiore di quella del mio computer nella sua totalità. Alla complessità degli organismi viventi fa riscontro l'elegante efficienza del loro progetto, così come si presenta. Se qualcuno non è d'accordo con me che un disegno così complicato esiga a gran voce una spiegazione, sono lieto di rinunciare a questo compito. No, dopo un attimo di riflessione non rinuncerei comunque, perché uno degli obiettivi che mi propongo in questo libro è quello di trasmettere almeno in parte la mia meraviglia dinanzi alla complessità biologica a quegli occhi che sono sempre rimasti chiusi dinanzi a essa. Ma, una volta magnificato il mistero, l'altro mio obiettivo è quello di eliminarlo e di spiegarne la soluzione. Spiegare è un'arte difficile. Si può spiegare qualcosa in modo che il lettore capisca le parole, e si può spiegare qualcosa in modo che il lettore diventi perfettamente padrone dell'argomento fin nelle pieghe più riposte. Per conseguire questo secondo obiettivo, a volte non è sufficiente esporre le prove in modo appassionato. Si deve prendere l'esempio da un avvocato e far ricorso a tutti i trucchi della retorica. Questo libro non è un trattato scientifico imparziale. Altri libri sul darwinismo lo sono, e molti di essi sono eccellenti e ricchi di informazione, e dovrebbero integrare la lettura di questo. Devo confessare che questo libro, lungi dall'essere «obiettivo», è stato scritto in varie sue parti con una passione che, in un periodico scientifico accademico, potrebbe suscitare dei commenti sfavorevoli. Senza dubbio questo libro si propone di informare, ma tende anche a persuadere e persino - è lecito specificare i propri obiettivi senza presunzione - a ispirare. Io vorrei ispirare il lettore, infondergli una visione della nostra propria esistenza concepita come un grande enigma, un mistero che fa correre brividi lungo la spina dorsale, e al tempo stesso trasmettergli tutta l'eccitazione del fatto che si tratta di un enigma che ha una soluzione elegante alla nostra portata. Vorrei inoltre convincere il lettore non solo che la visione darwiniana del mondo è di fatto quella vera, ma che è anche l'unica teoria nota in grado, in linea di principio, di risolvere il mistero della nostra esistenza. Possiamo dire perciò che essa sia una teoria doppiamente soddisfacente. Ci sono buoni argomenti per sostenere che il darwinismo è vero non solo su questo pianeta ma in qualsiasi parte dell'universo possa esistere la vita.

Sotto un certo aspetto ci tengo a differenziarmi dagli avvocati di professione. Un avvocato o un uomo politico è pagato per esercitare la sua passione e la sua persuasione a vantaggio del cliente o di una causa in cui a titolo privato potrebbe anche non credere. Io non ho mai fatto una cosa del genere e non la farò mai. Può anche darsi che io non abbia sempre ragione, ma mi prendo a cuore

appassionatamente la verità e non dico mai nulla in cui non creda. Ricordo che una volta, invitato da un'associazione universitaria a partecipare a un dibattito con i creazionisti, rimasi scandalizzato. A pranzo, dopo il dibattito, mi fu assegnato un posto a tavola accanto a una giovane donna che aveva tenuto un discorso abbastanza efficace a favore del creazionismo. Essendo convinto che non potesse essere una creazionista, le chiesi di dirmi con franchezza perché avesse tenuto quel discorso. Essa ammise sinceramente che lo aveva fatto per esercitarsi nella tecnica del dibattito e aggiunse che trovava più stimolante difendere una posizione nella quale non credeva. A quanto pare è un uso comune nelle associazioni universitarie di dibattiti dire semplicemente ai vari oratori per quale parte devono parlare. Le loro convinzioni non entrano affatto in gioco. Io avevo fatto molta strada per assolvere lo sgradevole compito di parlare in pubblico solo perché credevo nella verità della tesi che mi era stato chiesto di difendere. Quando scoprii che alcuni membri dell'associazione si servivano del dibattito come di un pretesto per fare i loro esercizi di retorica, decisi di declinare futuri inviti che mi fossero venuti da società culturali che incoraggiano l'uso di dibattere in modo insincero su problemi in cui è in gioco la verità scientifica.

Per ragioni che non mi sono del tutto chiare, il darwinismo sembra aver bisogno di essere difeso più di verità similmente affermate in altre branche della scienza. Molti di noi non hanno alcuna comprensione della teoria quantistica o delle teorie di Einstein della relatività speciale e generale, ma questo fatto non ci conduce di per sé a opporci a tali teorie! Il darwinismo, a differenza dell'«einsteinismo», sembra essere considerato un facile bersaglio da critici di qualsiasi livello di ignoranza. Mi pare di capire che un guaio, nel caso del darwinismo, risiede nel fatto che, come notò acutamente Jacques Monod, tutti credono di capirlo.

Esso è, in effetti, una teoria notevolmente semplice, e di livello addirittura infantile - si potrebbe pensare - rispetto alla quasi totalità della fisica e della matematica. Esso equivale, essenzialmente, alla semplice idea che una riproduzione non casuale, in presenza di variazioni ereditarie, ha conseguenze di vasta portata se queste hanno il tempo di accumularsi. Abbiamo però buone ragioni per credere che questa semplicità sia ingannevole. Non si deve mai dimenticare che, per quanto semplice la teoria possa sembrare, nessuno la escogitò prima di Darwin e Wallace, alla metà dell'Ottocento, quasi trecento anni dopo la pubblicazione dei Principia di Newton, e più di duemila anni dopo che Eratostene ebbe misurato la circonferenza terrestre. Come poté un'idea così semplice rimanere tanto a lungo ignota a pensatori della statura di Newton, Galileo, Descartes, Leibniz, Hume e Aristotele?

Perché essa dovette attendere sino ai naturalisti vittoriani? Quale fu l'errore per cui tanti filosofi e matematici se la lasciarono sfuggire? E com'è possibile che un'idea così efficace stenti ancora a tal punto a essere assorbita dalla coscienza popolare?

È quasi come se il cervello umano fosse stato specificamente progettato per fraintendere il darwinismo e per giudicarlo difficile da credere. Consideriamo, per esempio, il problema del «caso», spesso presentato teatralmente come cieco. La grande maggioranza delle persone che attaccano il darwinismo saltano spesso e volentieri all'idea erronea che in esso non ci sia altro che il caso. Dato che la complessità del vivente incarna l'antitesi stessa del caso, è ovvio che chi considera il darwinismo sinonimo del caso troverà ovviamente facile confutarlo! Uno fra i compiti che mi propongo in questo libro è quello di distruggere il mito, che gode di un così grande seguito, che il darwinismo sia una teoria del «caso». Un altro modo in cui noi sembriamo predisposti a dubitare del darwinismo consiste nel fatto che il nostro cervello è costruito per far fronte a eventi su scale di tempo radicalmente diverse da quelle che caratterizzano il mutamento evolutivo. Noi siamo equipaggiati a valutare processi che richiedono, per completarsi, secondi, minuti, anni o, al massimo, decenni. Il darwinismo è una teoria di processi cumulativi così lenti da richiedere, per completarsi, da migliaia a milioni di decenni. Tutti i nostri giudizi intuitivi circa i probabili sviluppi risultano sbagliati di molti ordini di grandezza. Il nostro apparato di giudizio fondato sullo scetticismo e sulla teoria della probabilità soggettiva è esposto a margini di errore molto grandi, essendo sintonizzato - per una curiosa ironia, a opera dell'evoluzione stessa - a lavorare entro una durata di vita di pochi decenni. Per evadere dalla prigione della scala di tempo che ci è familiare si richiedono grandi sforzi di immaginazione, sforzi che io tenterò di propiziare.

Un terzo aspetto sotto cui il nostro cervello sembra predisposto a resistere al darwinismo deriva dal nostro grande successo come progettisti creativi. Il nostro mondo è dominato da grandi lavori di ingegneria e da opere d'arte. Noi siamo del tutto abituati all'idea che una complessa eleganza presupponga un progetto, frutto di abilità e di intenzionalità. Questa è probabilmente la ragione più forte a sostegno della fede, condivisa dalla grande maggioranza delle persone, in passato come oggi, in una qualche sorta di divinità soprannaturale. Darwin e Wallace dovettero profondere un grande sforzo di immaginazione per rendersi conto che, contrariamente a ogni intuizione, c'è un altro modo - un modo che, una volta che lo si sia capito, è molto più plausibile - per spiegare come, dalla semplicità primeva, possa emergere un «disegno» complesso. Uno sforzo di immaginazione così grande che oggi molte persone sembrano ancora riluttanti a compierlo. Il principale intento che mi sono proposto in questo libro e quello di aiutare il lettore a compiere questo salto di immaginazione. Gli autori sono naturalmente inclini a sperare che i loro libri non abbiano una vita effimera ma possano al contrario esercitare un'influenza duratura. Ogni autore di parte, oltre a difendere la sua tesi dinanzi a un tribunale atemporale, deve però anche rispondere ai difensori contemporanei di punti di vista opposti, o apparentemente opposti. C'è il rischio che alcuni di questi argomenti, pur apparendo oggi ardentemente attuali, possano apparire terribilmente datati nei prossimi decenni. È stato spesso notato il paradosso che la prima edizione dell'Origine delle specie sembra più valida della sesta. Ciò dipende dal fatto che, nelle edizioni successive, Darwin si sentì obbligato a rispondere alle critiche rivolte alla prima edizione, critiche che oggi sembrano così datate da far apparire le risposte di Darwin inopportune, e in taluni luoghi addirittura svianti. Nondimeno, la tentazione di ignorare critiche contemporanee, anche quando le si consideri solo effimeri fuochi di paglia, è una tentazione cui un autore non deve indulgere, per ragioni di cortesia non solo verso i critici ma anche verso i loro lettori, destinati altrimenti a restare nella confusione. Benché io abbia mie idee personali su quali capitoli del mio libro si riveleranno infine effimeri per questa ragione, desidero però lasciare il giudizio al lettore e al tempo.

Sono afflitto nel constatare che alcune mie amiche (per fortuna non molte) considerino l'uso impersonale del pronome maschile come un segno dell'intenzione di escluderle. Se si dovesse escludere qualcuno (per fortuna non ce ne bisogno), io penso che escluderei più volentieri gli uomini, ma quando una volta feci il tentativo di riferirmi al mio lettore astratto col pronome personale femminile, una femminista mi accusò di avere usato una certa condiscendenza: avrei dovuto scrivere non «lei» bensì «lui o lei». Questo non sarebbe certo un compito difficile per chi non si preoccupasse dello stile, ma chi non si preoccupa dello stile non merita di avere lettori né dell'uno né dell'altro sesso.

In questo libro sono tornato alla normale convenzione del pronome maschile usato in forma impersonale per indicare individui di entrambi i sessi. Anche se nelle pagine che seguono mi riferirò sempre al mio lettore col pronome personale maschile, non penso affatto che i miei lettori siano specificamente maschili più di quanto si possa pensare che una cassapanca sia di sesso femminile. In realtà, quando penso ai miei lettori me li immagino forse più spesso come lettrici, ma questo è un fatto puramente personale e detesterei pensare che considerazioni del genere avessero influito sul modo in cui io uso la mia lingua materna.

Sono personali anche alcune delle ragioni che mi ispirano gratitudine verso una quantità di persone. Coloro a cui non posso rendere giustizia qui capiranno. Il mio editore non ha visto alcuna ragione per tenermi nascosta l'identità dei suoi lettori, referees (non «recensori», reviewers, poiché i veri recensori, con buona pace di molti americani sotto i quarantanni, criticano i libri solo dopo la loro pubblicazione, quando è ormai troppo tardi perché un autore possa tenerne conto), e io ho tratto molto beneficio dai suggerimenti di John Krebs (di nuovo), di John Durant, di Graham Cairns-Smith, di Jeffrey Levinton, di Michael Ruse, di Anthony Hallam e di David Pye. Richard Gregory ha espresso le sue cortesi critiche al capitolo XII, e la versione finale del libro ha tratto vantaggio dalla sua completa eliminazione. Mark Ridley e Alan Grafen, che ora non sono più miei studenti neppure ufficialmente, sono, assieme a Bill Hamilton, le menti principali del gruppo di colleghi con cui io discuto di evoluzione e dalle cui idee traggono beneficio quasi quotidianamente. Questi - Pamela Wells, Peter Atkins e John Dawkins - mi sono stati d'aiuto criticando per me vari capitoli. Sarah

Bunney apportò numerosi miglioramenti, e John Gribbin corresse un grave errore. Alan Grafen e Will Atkinson mi hanno dato consigli su problemi concernenti i computer, e l'Apple Macintosh Syndicate del dipartimento di Zoologia mi ha concesso gentilmente di usare la sua stampante laser per disegnare i biomorfi.

Ancora una volta ho tratto vantaggio dall'instancabile dinamismo di Michael Rodgers, ora alla Longman. Egli, e Mary Cunnane della Norton, applicarono abilmente l'acceleratore (al mio morale) e il freno (al mio senso dell'umorismo) a seconda del bisogno. Il libro è stato scritto in parte durante un anno sabbatico gentilmente concessomi dal dipartimento di Zoologia e dal New College. Infine - debito che avrei dovuto riconoscere già nei miei due libri precedenti - il sistema didattico di Oxford dei corsi affidati a tutors e i molti studenti di zoologia che ho avuto nel corso degli anni mi hanno aiutato a fare un uso pratico di quelle poche abilità che posso avere nella difficile arte della spiegazione.

R.D.

Oxford, 1986

I

Spiegare il molto improbabile

Noi animali siamo le cose più complicate che esistano nell'universo conosciuto. Il nostro universo è, ovviamente, solo un minuscolo frammento dell'universo reale. Su altri pianeti potrebbero esistere oggetti ancora più complicati di noi, e alcuni di essi potrebbero essere già informati della nostra esistenza. Ciò non incide però sull'osservazione che vorrei fare. Le cose complicate, dovunque si trovino, meritano un tipo specialissimo di spiegazione. Noi vogliamo sapere come abbiano avuto origine e perché siano così complicate. Sono propenso a credere che la spiegazione debba essere grosso modo la stessa per le cose complicate in qualsiasi parte dell'universo; la stessa per noi, per gli scimpanzé, per i vermi, per le querce e per i mostri che vengono dallo spazio. D'altra parte non sarà così per quelle che chiamerò le cose «semplici», come le pietre, le nuvole, i fiumi, le galassie e i quark. Queste cose sono gli oggetti di cui si occupano le scienze fisiche. Scimpanzé e cani e pipistrelli e scarafaggi e persone e vermi e denti di leone e batteri ed esseri alieni sono oggetti della biologia.

La differenza consiste nella complessità del progetto. La biologia è lo studio di cose complicate che danno l'impressione di essere state progettate in vista di un fine. La fisica è lo studio di cose semplici che non ci inducono nella tentazione di invocare un disegno deliberato. A tutta prima oggetti costruiti dall'uomo come computer e automobili sembrerebbero costituire delle eccezioni. Essi sono complicati e chiaramente costruiti in vista di uno scopo, eppure non sono vivi e sono fatti di metallo e plastica anziché di carne e ossa. In questo libro li tratterò decisamente come oggetti biologici.

La risposta del lettore a questa presa di posizione potrebbe consistere nel chiedere: «Sì, ma sono realmente oggetti biologici?». Le parole sono al nostro servizio, non noi al loro. A fini diversi noi possiamo trovare utile usare le parole in significati diversi. La maggior parte dei libri di cucina classificano le aragoste come pesci. I biologi possono rischiare un colpo apoplettico per questo, sottolineando che avrebbero più ragione le aragoste di chiamare noi pesci, dal momento che i pesci sono tassonomicamente molto più vicini agli esseri umani che non a esse. E, parlando di giustizia e di aragoste, ho sentito dire che un tribunale si è trovato recentemente nella necessità di decidere se le aragoste fossero insetti o «animali» (dalla risoluzione di questo problema dipendeva se si poteva permettere alla gente di bollire le aragoste vive). Zoologicamente parlando, è sicuro che le aragoste non sono insetti. Esse sono animali, ma anche gli insetti sono animali, e anche noi non facciamo

eccezione. È poco utile prendersela tanto per come le diverse persone usano le parole (anche se nella mia vita non professionale io sono prontissimo a prendermela con le persone che gettano le aragoste vive nell'acqua bollente). Cuochi e avvocati hanno bisogno di usare le parole a modo loro, e farò anch'io così in questo libro. Non dobbiamo prendere troppo sul serio il problema se automobili e computer siano «realmente» oggetti biologici. Il punto è che, se qualcosa di complessità paragonabile venisse trovato su un pianeta, non avremmo alcuna esitazione nel concludere che su di esso esiste la vita, o che vi è esistita un tempo. Le macchine sono prodotti diretti di esseri viventi; esse derivano la loro complessità e il loro disegno da oggetti viventi e attestano l'esistenza della vita su un pianeta. Lo stesso vale per fossili, scheletri e cadaveri. Ho detto che la fisica è lo studio di cose semplici e a tutta prima anche quest'affermazione può sembrare strana. La fisica sembra un argomento complicato perché le idee della fisica sono per noi difficili da capire. Il nostro cervello è stato progettato per capire la caccia e la raccolta, l'accoppiamento e il compito di allevare i figli; un mondo di oggetti di media grandezza che si muovono nelle tre dimensioni a velocità moderate. Noi siamo mentalmente male equipaggiati per capire oggetti molto piccoli e molto grandi, cose la cui durata si misura in picosecondi o in giganni; particelle che non hanno una posizione; forze e campi che non possiamo vedere o toccare. Noi pensiamo che la fisica sia complicata perché per noi è difficile da capire, e perché i libri di fisica sono pieni di complesse formule matematiche. Ma gli oggetti studiati dai fisici sono ancora oggetti fondamentalmente semplici. Essi sono nuvole di gas o minuscole particelle, o masse di materia uniforme come i cristalli, in cui strutture atomiche si ripetono quasi senza fine. Essi non hanno parti funzionanti complesse, almeno a paragone con gli oggetti biologici. Persino oggetti fisici di dimensioni molto grandi, come le stelle, sono formati da un numero di parti distinte piuttosto limitato, disposte in modo più o meno casuale. Il comportamento di oggetti fisici, non biologici, è così semplice che possiamo usare, per descriverlo, il linguaggio matematico esistente ed è appunto questa la ragione per cui i libri di fisica sono pieni di matematica.

I libri di fisica possono essere complicati, ma essi, come le automobili e i computer, sono i prodotti di oggetti biologici: ossia di cervelli umani. Gli oggetti e i fenomeni descritti da un libro di fisica sono più semplici di una singola cellula nel corpo del suo autore. E l'autore è formato da bilioni di quelle cellule, molte delle quali diverse l'una dall'altra, organizzate con una complessa architettura e una tecnica di precisione in una macchina funzionante, capace di scrivere un libro. Il nostro cervello non è meglio equipaggiato a far fronte agli estremi di complessità che agli estremi di grandezza e agli altri difficili estremi della fisica. Nessuno ha ancora inventato la matematica necessaria per descrivere nella sua globalità la struttura e il comportamento di un oggetto così complesso come un fisico, o anche solo come una delle sue cellule. Quel che possiamo fare è di capire alcuni dei principi generali di come le cose viventi funzionano e perché esse esistano in generale.

Fu questo il punto in cui entrammo in scena noi. Volevamo sapere perché esistiamo, e perché esistono tutte le altre cose complicate. E oggi siamo in grado di rispondere a tali domande in termini generali, anche se non sappiamo ancora comprendere i particolari della complessità stessa. Per fare un'analogia, la maggior parte di noi non capisce nei particolari come funzioni un aereo di linea. Probabilmente non lo capiscono a fondo neppure i suoi costruttori: gli specialisti dei motori non capiscono nei particolari le ali, e gli specialisti delle ali comprendono i motori solo in modo vago. Gli specialisti delle ali non capiscono con un'assoluta precisione matematica neppure le ali: essi possono predire come si comporterà un'ala in condizioni di turbolenza solo esaminando un modello in una galleria del vento o una simulazione al computer: lo stesso tipo di cosa cui può far ricorso un biologo per capire un animale. Ma per quanto incompleta sia la nostra comprensione del modo in cui funziona un aereo di linea, noi tutti comprendiamo in virtù di quale processo generale esso abbia avuto origine. Esso è stato progettato su tavoli da disegno da esseri umani. Poi altri esseri umani hanno costruito le parti sulla base del progetto, e molti altri esseri umani (con l'aiuto di altre macchine progettate da altri esseri umani) hanno imbullonato, rivettato, saldato o incollato assieme i pezzi, ciascuno al posto giusto. Il processo per mezzo del quale un aereo di linea è venuto all'esistenza non è fondamentalmente misterioso per noi, poiché esso è stato costruito da esseri umani. La composizione sistematica di una pluralità di parti in vista di un disegno intenzionale è

qualcosa che noi conosciamo e comprendiamo bene, avendola sperimentata di persona, non foss'altro che giocando nella nostra infanzia col Meccano o altre scatole di montaggio.

Che dire del nostro corpo? Ciascuno di noi è una macchina, come un aereo di linea, anche se molto più complicata. Anche noi siamo stati progettati su un tavolo da disegno, e le nostre parti sono state montate da un abile tecnico? La risposta è: no.

È una risposta sorprendente, e noi la conosciamo e la comprendiamo solo da un secolo circa.

Quando Charles Darwin spiegò per la prima volta questi concetti, molte persone non vollero o non poterono capire. Io stesso mi rifiutai decisamente di credere alla teoria di Darwin la prima volta che ne sentii parlare da bambino. Nel corso della storia, fino alla seconda metà dell'Ottocento, quasi tutti avevano creduto fermamente nella tesi opposta: la teoria di un disegno divino intenzionale.

Molte persone credono ancora a una creazione divina, forse perché la spiegazione vera della nostra esistenza, quella data da Darwin, non è ancora diventata una parte di routine del curriculum dell'istruzione generale. Si può certamente affermare senza tema di smentita che la teoria di Darwin è ancor oggi fraintesa da molte persone.

L'orologiaio che dà il titolo a questo libro è preso a prestito da un famoso trattato del teologo settecentesco William Paley.

La sua Teologia naturale o sia prove della esistenza e degli attributi della divinità ricavate dalle apparenze della natura, edita nel 1802, è l'esposizione meglio nota dell'«argomento del disegno divino», che è sempre il più influente fra gli argomenti a sostegno dell'esistenza di un Dio. Io ammiro molto il libro di Paley perché il suo autore riuscì a fare ai suoi tempi quel che io sto sforzandomi di fare ora. Paley aveva una tesi da dimostrare, credeva in essa appassionatamente e non risparmiò alcuno sforzo per ficcarla bene in testa nel modo più chiaro ai suoi lettori. Egli aveva una giusta reverenza per la complessità del mondo vivente, e si rese conto che essa richiede un tipo molto speciale di spiegazione. L'unica cosa in cui sbagliò - anche se non è certo una cosa da poco! - fu la spiegazione stessa. Egli fornì la risposta religiosa tradizionale all'enigma, ma la espresse in modo più chiaro e più convincente di chiunque altro prima di lui. La vera spiegazione è molto diversa, e sarebbe stata trovata solo da uno fra i pensatori più rivoluzionari di tutti i tempi: Charles Darwin.

Paley apre la Teologia naturale con un brano famoso: Attraversando una brughiera, supponiamo che io avessi urtato col piede contro una pietra, e che qualcuno mi avesse chiesto in che modo la pietra fosse venuta a trovarsi là; io avrei forse potuto rispondere che, a quanto ne sapevo, quella pietra poteva trovarsi là da sempre: né forse sarebbe stato molto facile dimostrare l'assurdità di quella risposta. Supponiamo però che io avessi trovato al suolo un orologio, e che mi fosse stato chiesto in che modo l'orologio si trovasse là; io non avrei certo potuto pensare alla risposta che avevo dato prima, ossia che, a quanto ne sapevo, l'orologio poteva essere là da sempre.

Paley dimostra qui di saper apprezzare la differenza fra oggetti fisici naturali come pietre e oggetti prodotti da un artefice come gli orologi. Egli prosegue esponendo la precisione con cui sono costruiti gli ingranaggi e le molle di un orologio, e la complessità con cui sono montati. Se noi trovassimo in una brughiera un oggetto come un orologio, anche se non sapessimo in che modo esso avesse avuto origine, la sua precisione e la complessità del progetto ci costringerebbero a concludere che l'orologio deve avere avuto un costruttore; che devono essere esistiti, in qualche tempo e in qualche luogo, un artefice o degli artefici che lo formarono in vista del fine al quale noi vediamo che effettivamente risponde, che ne comprendevano la struttura e ne progettavano l'uso.

Nessuno potrebbe ragionevolmente dissentire da questa conclusione. Paley insiste, però, che questo è proprio ciò che fa l'ateo, quando contempla le opere della natura, giacché ogni indicazione di inventiva, ogni manifestazione di un progetto intelligente che esistevano nell'orologio esistono anche nelle opere della natura; con la differenza, a vantaggio della natura, di una maggiore grandezza, e ciò in un grado che sfida ogni calcolo.

Paley dimostra la sua tesi con belle e reverenti descrizioni del meccanismo della vita, che disseziona, a cominciare dall'occhio umano, uno fra gli esempi preferiti in questo genere di argomentazioni, esempio che sarebbe stato usato in seguito anche da Darwin e che riappare nell'intero corso di questo libro. Paley paragona l'occhio a uno strumento progettato dall'uomo come

un telescopio e conclude che «ce precisamente la stessa dimostrazione che l'occhio sia stato costruito per vedere, e che il telescopio sia stato costruito per aiutare l'occhio». L'occhio deve avere avuto un progettista, esattamente come il telescopio.

L'argomentazione di Paley viene condotta con appassionata sincerità ed è informata alle migliori conoscenze biologiche del tempo, ma è sbagliata, clamorosamente e totalmente sbagliata.

L'analogia fra il telescopio e l'occhio, fra l'orologio e l'organismo vivente, è falsa. Nonostante ogni apparenza del contrario, l'unico orologiaio in natura sono le forze cieche della fisica, anche se impiegate in un modo speciale. Un vero orologiaio ha la prescienza: egli progetta i suoi ingranaggi e le sue molle e ne prevede le interconnessioni, avendo in vista il fine futuro. La selezione naturale, il processo cieco, inconscio, automatico che fu scoperto da Darwin e che, come noi oggi sappiamo, è la spiegazione dell'esistenza e della forma apparentemente finalistica di ogni essere vivente, non ha in vista alcun fine. Essa non ha una mente né alcuna forma di coscienza. Non progetta per il futuro. Non vede, non ha alcuna forma di preveggenza. Se si può dire che essa svolge il ruolo di orologiaio in natura, è l'orologiaio cieco.

Spiegherò tutto questo, e molte altre cose ancora. Ma una cosa che non farò è quella di sminuire la meraviglia verso gli «orologi» viventi che ispirò così fortemente Paley. Al contrario, cercherò di illustrare la mia convinzione che Paley avrebbe potuto spingersi ancor oltre. Quando si tratta di sentir reverenza per gli «orologi» viventi, io non rimango indietro a nessuno. Io mi sento più vicino al reverendo William Paley che non al famoso filosofo moderno, ateo ben noto, con cui discussi una volta su questo argomento a pranzo. Alla mia affermazione che non potevo immaginare come avrei potuto essere ateo se fossi nato prima del 1859, l'anno di pubblicazione dell'Origine delle specie di Darwin, il filosofo ribatté: «Che cosa ne dici di Hume?». «In che modo Hume spiegò la complessità organizzata del mondo vivente?» chiesi a mia volta. «Non la spiegò» disse il filosofo.

«Perché mai essa avrebbe bisogno di una speciale spiegazione?» Paley sapeva che essa aveva bisogno di una speciale spiegazione; anche Darwin lo sapeva, e io sospetto che nel suo intimo lo sapesse anche il filosofo che pranzò assieme a me. In ogni caso questo è il compito che io mi propongo qui. Quanto a David Hume, a volte si dice che il grande filosofo scozzese fece piazza pulita dell'argomento del disegno divino un secolo prima di Darwin. Ma il contributo di Hume si ridusse semplicemente a criticare la logica di usare il disegno apparente in natura come una prova positiva a sostegno dell'esistenza di un Dio. Egli non offrì alcuna spiegazione alternativa del disegno apparente, ma lasciò aperto il problema. Un ateo prima di Darwin avrebbe potuto dire, seguendo Hume: «Io non ho alcuna spiegazione per il complesso disegno biologico. Tutto ciò che so è che Dio non è una buona spiegazione, cosicché dobbiamo attendere e sperare che qualcuno ne trovi una migliore». Io non posso fare a meno di pensare che una tale posizione, per quanto logicamente sana, non potesse essere soddisfacente e che, per quanto l'ateismo possa essere stato logicamente sostenibile prima di Darwin, soltanto Darwin abbia creato la possibilità di adottare un punto di vista ateo con piena soddisfazione intellettuale. Mi piace pensare che lo stesso Hume sarebbe stato d'accordo ma alcuni suoi scritti suggeriscono che egli abbia sottovalutato la complessità e la bellezza del disegno biologico. Charles Darwin, già con le nozioni di storia naturale che aveva da ragazzo, avrebbe potuto mostrargli un paio di cosette in proposito, ma quando Darwin si iscrisse all'università di Hume a Edimburgo, il vecchio filosofo era ormai passato a miglior vita da quarantanni.

Ho parlato in modo piuttosto disinvolto della complessità e del disegno apparente, come se il significato di queste parole fosse ovvio. E in un certo senso è ovvio: la maggior parte delle persone ha un'idea intuitiva di che cosa significa la complessità.

Ma queste nozioni, la complessità e il disegno, sono così centrali in questo libro che devo tentare di definire in modo un po' più preciso, a parole, la nostra convinzione che in cose complesse, e prodotte in apparenza da un disegno deliberato, ci sia qualcosa di speciale.

Che cos'è dunque una cosa complessa? Come dovremmo riconoscerla? In che senso è valido dire che un orologio o un aereo di linea o un dermattico o una persona sono complessi mentre la Luna è semplice? Il primo punto che potrebbe venirci in mente come attributo necessario di una cosa complessa è che essa ha una struttura eterogenea. Un budino o un semolino è semplice nel senso

che, se lo tagliamo in due, le due parti avranno la stessa costituzione interna: un semolino è omogeneo.

Un'automobile, di contro, è eterogenea: a differenza di un semolino, quasi ogni parte della macchina è diversa dalle altre parti. Due mezze automobili non fanno un'automobile. Ciò equivale spesso a dire che un oggetto complesso, a differenza di uno semplice, ha molte parti, le quali sono di più di un genere.

Tale eterogeneità - o composizione in più parti - può essere una condizione necessaria ma non sufficiente. Una grande varietà di oggetti sono suddivisi in molte parti ed eterogenei nella loro struttura interna, senza essere però complessi nel senso in cui io desidero usare il termine. Il monte Bianco, per esempio, è composto da molti tipi diversi di roccia, tutti accozzati assieme in modo tale che, se si tagliasse la montagna in un punto qualsiasi, le due parti differirebbero l'una dall'altra nella loro costituzione interna. Il monte Bianco ha un'eterogeneità di struttura inesistente in un semolino, ma non è ancora complesso nel senso in cui usa il termine un biologo.

Proviamo ora a seguire un'altra via nella ricerca di una definizione della complessità, servendoci a questo scopo dell'idea matematica di probabilità. Supponiamo di provare la seguente definizione: una cosa complessa è qualcosa le cui parti componenti sono organizzate in modo tale che è improbabile che abbiano avuto origine in virtù del solo caso. Per riproporre un'analogia già usata da un astronomo eminente, se prendiamo le parti di un aereo di linea e le accozziamo assieme a caso, la probabilità che da una tale combinazione casuale venga prodotto un Boeing funzionante è evanescentemente piccola. Esistono miliardi di modi possibili di combinare i pezzi di un aereo di linea e solo uno, o pochissimi, di essi possono darci effettivamente un aereo di linea. Ancora minore è il numero dei modi per comporre in un'unità funzionante, operando alla rinfusa, le parti di un essere umano.

Questo approccio a una definizione della complessità è promettente, ma manca ancora qualcosa.

Esistono, si può dire, miliardi di modi di mettere assieme i pezzi del monte Bianco, e soltanto uno di essi è il monte Bianco. Che cos'è dunque che rende l'aereo di linea e l'essere umano complicati, mentre il monte Bianco è semplice? Qualsiasi collezione di parti accozzate assieme è unica e, considerata retrospettivamente, altrettanto improbabile quanto qualsiasi altra. Il mucchio di rottami di ferro in un cantiere di demolizione di aerei è unico. Non esistono due mucchi di rottami uguali. Se cominciamo ad accumulare frammenti di aerei in mucchi, la probabilità di imbroggiare due volte esattamente la stessa disposizione dei pezzi è esattamente altrettanto piccola quanto quella di ottenere un aereo di linea funzionante. Perché dunque non diciamo che un cumulo di rifiuti, o il monte Bianco, o la Luna, sono altrettanto complessi quanto un aereo o un cane, dato che in tutti questi casi la disposizione degli atomi è altrettanto «improbabile»?

Il lucchetto a combinazione sulla mia bicicletta ha 4096 posizioni diverse. Ognuna di queste è altrettanto «improbabile» nel senso che, se si fanno girare le rotelle del lucchetto a caso, la probabilità che venga una qualsiasi delle 4096 posizioni è altrettanto piccola quanto quella di qualsiasi altra. Io posso girare le rotelle a caso, guardare il numero che è venuto fuori ed esclamare post factum: «Che cosa sorprendente. Le probabilità contro questo numero erano 4096 a 1. Un piccolo miracolo!». Questo ragionamento equivale a considerare «complessa» la particolare disposizione delle rocce in una montagna, o dei pezzi di metallo in un cumulo di rottami. Ma solo una di quelle 4096 posizioni è in realtà unica in un senso interessante: la combinazione 1207 è l'unica che apre il lucchetto. L'unicità del 1207 non ha niente a che fare col senno di poi: essa è specificata in anticipo dal produttore. Se, facendo girare le rotelle a caso, ci capitasse di imbroggiare proprio il numero 1207, potremmo rubare la bicicletta, e questo sembrerebbe un piccolo miracolo. Se riuscissimo ad azzeccare per fortuna una delle combinazioni a molte ruote su una cassaforte di banca, questo ci sembrerebbe un miracolo molto grande, poiché le probabilità contrarie sono di molti milioni a 1, e potremmo rubare una fortuna.

Ora, indovinare il numero fortunato che apre la cassaforte di una banca è l'equivalente, nella nostra analogia, di gettare dei rottami di metallo in un mucchio e di accorgerci di avere montato per caso un Boeing 747. Fra tutti i milioni di posizioni uniche e, col senno di poi, altrettanto improbabili, della serratura a combinazione, soltanto una apre la serratura. Similmente fra tutti i milioni di

disposizioni uniche e, col senno di poi, altrettanto improbabili, del mucchio di rottami, soltanto una (o pochissime) saranno in grado di volare. L'unicità della disposizione che riesce a sollevarsi dalla pista di decollo, o che apre la cassaforte, non ha niente a che fare col senno di poi. Essa è specificata in anticipo. È stato il produttore della serratura a fissare la combinazione e a comunicarla al funzionario della banca. La capacità di volare è una proprietà di un aereo di linea che noi specifichiamo in anticipo. Se vediamo un aereo in aria possiamo essere sicuri che esso non è stato montato gettando a caso dei pezzi di metallo in un mucchio, perché sappiamo che la probabilità che una tale accozzaglia casuale di pezzi possa alzarsi in volo è troppo piccola per poter essere presa in considerazione.

Ora, se consideriamo tutti i modi possibili in cui le rocce del monte Bianco potevano essere ammassate, è vero che l'unica che ci avrebbe dato il monte Bianco quale lo conosciamo è definita a posteriori. Uno qualsiasi di un enorme numero di modi di accozzare assieme delle rocce ci avrebbe dato una montagna, la quale avrebbe potuto essere chiamata il monte Bianco.

Non ce n'è niente di speciale nel particolare monte Bianco che conosciamo, niente di specificato in anticipo, niente di equivalente alla capacità dell'aereo di decollare o all'apertura della cassaforte che consente di mettere le mani sul denaro contenuto nel suo interno.

Qual è l'equivalente dell'apertura della cassaforte, o del volo dell'aereo, nel caso di un corpo vivente? Si può dire che a volte sia quasi esattamente la stessa cosa. Le rondini volano. Come abbiamo visto, non è facile mettere assieme una macchina volante. Se prendiamo tutte le cellule di una rondine e le componiamo a caso, la probabilità che l'oggetto risultante voli non è, a fini pratici, diverso da zero. Non tutte le cose viventi volano, ma fanno altre cose che sono altrettanto improbabili, e altrettanto specificabili in anticipo. I cetacei non volano ma nuotano, e nuotano con la stessa efficienza con cui le rondini volano. La probabilità che un'aggregazione casuale di cellule di cetaceo nuoti, per non dire di nuotare con la stessa velocità ed efficienza di un cetaceo, è trascurabilmente piccola.

A questo punto qualche filosofo dallo sguardo acuto come quello dell'aquila (le aquile hanno occhi molto acuti: non si potrebbe mai ottenere un occhio d'aquila componendo in modo casuale lenti cristalline e cellule sensibili alla luce) comincerà a borbottare qualcosa sulla circolarità dell'argomentazione. Le rondini volano ma non nuotano, e i cetacei nuotano ma non volano. È col senno di poi che noi decidiamo se giudicare il successo del nostro aggregato casuale di cellule come volatore o come nuotatore. Supponiamo di accordarci a giudicare il successo del nostro aggregato di cellule come X-atore, lasciando impregiudicato che cosa significhi esattamente X finché non avremo fatto il tentativo di combinare assieme le cellule in modo casuale. L'aggregato casuale di cellule potrebbe risultare un efficiente scavatore, come una talpa, o un eccellente arrampicatore, come una scimmia cinomorfa. Potrebbe essere molto bravo a librarsi nel vento, o ad aggrapparsi a rocce scivolose o a muoversi in cerchi sempre decrescenti. L'elenco potrebbe continuare a lungo. O no?

Se l'elenco potesse realmente continuare a lungo, il mio ipotetico filosofo potrebbe avere un appiglio. Se, aggregando in modo casuale della materia, si potesse spesso dire, col senno di poi, che il conglomerato risultante è buono a qualcosa, sarebbe giusto obiettare che ho barato parlando della rondine e del cetaceo. Ma i biologi possono essere molto più specifici quando si tratta di definire che cosa si debba intendere per «buono a qualcosa». La richiesta minima per indurci a riconoscere un oggetto come un animale o come una pianta è che esso dovrebbe riuscire in qualche modo a procurarsi i mezzi di sostentamento (più precisamente, che esso, o almeno alcuni membri della sua specie, dovranno riuscire a vivere abbastanza a lungo per riprodursi). È vero che ci sono molti modi diversi per procurarsi i mezzi di sostentamento, come volare, nuotare, arrampicarsi sugli alberi e via dicendo. Ma, per quanti modi possano esserci di essere in vita, è certo che esistono molti più modi di essere morti, o piuttosto non vivi. Si possono combinare cellule a caso, continuando a darsi da fare per un miliardo di anni senza ottenere mai un conglomerato che voli o nuoti o scavi o corra o faccia, anche male, una cosa qualsiasi che possa essere interpretata anche lontanamente come un lavorare per mantenersi in vita.

Questa è stata un'argomentazione protratta a lungo ed è venuto il momento di richiamare alla mente

come ci siamo imbarcati in essa all'inizio. Stavamo cercando un modo preciso per esprimere che cosa intendiamo quando definiamo una cosa complicata. Tentavamo di precisare che cosa esseri umani e talpe e vermi e aerei di linea e orologi abbiano in comune fra loro, ma non col semolino o col monte Bianco o con la Luna. La risposta a cui siamo pervenuti è che le cose complicate hanno una qualche qualità, specificabile in anticipo, che è molto improbabile sia stata acquisita in virtù del solo caso. Nella fattispecie delle cose viventi, la qualità che è specificata in anticipo è, in un certo senso, l'«efficienza»; o l'efficienza in una particolare abilità come il volo, quale potrebbe essere ammirata da un ingegnere aeronautico; o l'efficienza in qualcosa di più generale, come l'abilità di evitare la morte, o la capacità di propagare i propri geni nella riproduzione.

Riuscire a evitare la morte è una cosa che richiede un certo lavoro. Lasciato a se stesso - che è ciò che succede quando muore - il corpo tende a tornare a uno stato di equilibrio col suo ambiente. Se si misura una qualche quantità, come la temperatura, l'acidità, il contenuto d'acqua o il potenziale elettrico in un corpo vivente, si trova che essa è considerevolmente diversa dalla misura corrispondente nell'ambiente esterno. Il nostro corpo, per esempio, è di solito più caldo dell'ambiente, e nei climi freddi deve lavorare parecchio per mantenere tale differenza. Quando noi moriamo quel lavoro si arresta, la differenza di temperatura tende a sparire e noi finiamo con l'avere la stessa temperatura dell'ambiente. Non tutti gli animali lavorano altrettanto duramente per evitare di venire a trovarsi in equilibrio con la temperatura dell'ambiente, ma tutti compiono un qualche lavoro comparabile. Per esempio, in un paese arido, animali e piante lavorano per mantenere il contenuto di liquidi delle loro cellule, lavorano contro una tendenza naturale dell'acqua a fluire da loro all'ambiente esterno arido. Se essi non riescono a conservare i loro liquidi corporei muoiono. Più in generale, se gli organismi vivi non lavorassero attivamente a scongiurare questa possibilità, finirebbero col fondersi col loro ambiente e cesserebbero di esistere come esseri autonomi. Questo è ciò che accade quando muoiono.

Con l'eccezione delle macchine artificiali, che abbiamo già convenuto di considerare alla stregua di cose viventi onorarie, le cose non viventi non funzionano in questo modo. Esse non oppongono resistenze alle forze che tendono a portarle in equilibrio con l'ambiente. Il monte Bianco, senza dubbio, esiste da molto tempo, e probabilmente esisterà ancora per molto, ma non compie alcun lavoro per continuare a esistere. Quando una pietra viene a fermarsi sotto l'influenza della gravità, non si muove più. Non è necessario compiere alcun lavoro per mantenerla in quella posizione. Il monte Bianco esiste, e continuerà a esistere finché non sarà cancellato dall'erosione o distrutto da un terremoto. Diversamente da un organismo vivo, esso non fa nulla per rimediare all'usura del tempo o per riparare i danni di possibili eventi catastrofici. Esso si limita solo a obbedire alle leggi comuni della fisica.

Quest'affermazione equivale forse a negare che gli esseri viventi obbediscano alle leggi della fisica? Certamente no. Non c'è alcuna ragione per pensare che nella materia vivente vengano violate le leggi della fisica. Non esiste niente di soprannaturale, nessuna «forza vitale» in antagonismo alle forze fondamentali della fisica. È solo che, se si cerca di usare le leggi della fisica in modo ingenuo per capire il comportamento di un corpo vivente nella sua globalità, si troverà che non ci si può spingere molto lontano. Il corpo è una cosa complessa con molte parti componenti, e per comprenderne il comportamento si devono applicare le leggi della fisica alle sue parti, non al tutto. Il comportamento del corpo nella sua globalità emergerà quindi come una conseguenza delle interazioni delle parti.

Consideriamo per esempio le leggi del moto. Se gettiamo in aria un uccello morto, esso descriverà una elegante parabola, esattamente come dicono i libri di fisica parlando del moto di proiezione, dopo di che cadrà al suolo e vi resterà immobile. Esso si comporta come dovrebbe comportarsi un corpo solido avente una determinata massa e una determinata resistenza aerodinamica. Se gettiamo in aria un uccello vivo, esso non descriverà una parabola e non verrà a fermarsi al suolo, ma volerà via e potrebbe non toccare più terra finché non sarà oltre i confini di questa provincia. La ragione di questo diverso comportamento consiste nel fatto che esso ha muscoli che lavorano per resistere alla gravità e ad altre forze fisiche che agiscono su tutto il suo corpo. All'interno di ogni cellula dei muscoli vengono osservate le leggi della fisica. Il risultato è che i muscoli muovono le ali in modo

tale che l'uccello riesce a stare in aria. L'uccello non viola affatto la legge di gravità. Esso viene attratto costantemente dalla gravità verso il basso, ma le sue ali compiono un lavoro attivo - obbedendo nei loro muscoli alle leggi della fisica - per mantenerlo in volo nonostante la forza di gravità. Noi penseremo che esso sfidi una legge fisica se saremo così ingenui da trattarlo semplicemente come un aggregato di materia con una certa massa e una certa resistenza aerodinamica. Solo ricordando che esso ha molte parti interne, le quali obbediscono tutte alle leggi della fisica al loro proprio livello, saremo in grado di comprendere il comportamento del corpo nella sua globalità. Questa non è, ovviamente, una peculiarità delle cose viventi, ma una proprietà che si applica anche a tutte le macchine costruite dall'uomo, e potenzialmente a ogni oggetto complesso formato da molte parti.

Queste considerazioni mi conducono all'argomento finale che desidero discutere in questo capitolo piuttosto filosofico, ossia il problema di che cosa intendiamo per spiegazione. Abbiamo già visto quale significato vogliamo dare al concetto di una cosa complessa. Ma quale tipo di spiegazione potremo considerare soddisfacente se ci chiediamo come funzioni una macchina complicata, o un corpo vivente? La risposta è quella a cui siamo pervenuti nel paragrafo precedente. Se desideriamo capire come funzioni una macchina o un corpo vivente, guardiamo le sue parti componenti e ci chiediamo in che modo interagiscano fra loro. Se c'è una cosa complessa che non comprendiamo ancora, potremo pervenire a capirla dopo aver capito come funzionano le sue parti componenti, più semplici.

Se chiedo a un ingegnere come funzioni una macchina a vapore, ho un'idea abbastanza precisa del tipo generale di risposta che potrei considerare soddisfacente. Come Julian Huxley, non resterei affatto impressionato se l'ingegnere mi dicesse che essa viene azionata dalla «forza locomotiva». E se cominciasse a pontificare sul fatto che il tutto è maggiore della somma delle sue parti, lo interrompereì: «Non si preoccupi di ciò, mi dica solo come funziona». Quel che vorrei sapere è qualcosa sul modo in cui le parti della macchina interagiscono fra loro per produrre il comportamento della macchina nella sua globalità. All'inizio sarei preparato ad accettare una spiegazione nei termini di parti componenti abbastanza grandi, la cui struttura e il cui comportamento interni potrebbero essere anche molto complicati e finora inspiegati. Le unità di una spiegazione in un primo momento soddisfacente potrebbero avere nomi come forno, caldaia, cilindro, pistone, regolatore del vapore. L'ingegnere direbbe, senza fornire inizialmente alcuna spiegazione, che cosa fa ciascuna di queste unità. Io accetterei per il momento tale spiegazione, rinunciando a chiedere in che modo ciascuna unità assolva il suo particolare compito. Concedendo che ciascuna unità assolva il suo particolare compito, posso capire in che modo esse interagiscono per far muovere la macchina a vapore nella sua globalità.

Ovviamente, io ho poi la facoltà di chiedere anche in che modo ciascuna parte funzioni. Avendo in precedenza accettato il fatto che il regolatore determini la misura del flusso di vapore, e avendo usato questo fatto nella mia comprensione del comportamento della macchina nella sua globalità, rivolgo ora la mia curiosità al regolatore del vapore stesso. Ora vorrei capire in che modo esso consegua il suo proprio comportamento, in funzione delle parti che lo compongono. All'interno delle parti componenti c'è una gerarchia di subcomponenti. Noi spieghiamo il comportamento di un componente, a ogni livello dato, nei termini di interazioni fra subcomponenti la cui propria organizzazione interna viene data per il momento per scontata. Ci addentriamo in tal modo nella gerarchia, un livello dopo l'altro, fino a raggiungere unità così semplici che, ai nostri fini quotidiani, non sentiamo più il bisogno di porre domande su di esse. A ragione o a torto, per esempio, la maggior parte di noi si accontenta di dare per scontate le proprietà di barre di ferro rigide, e noi siamo pronti a usarle come unità di spiegazione di macchine più complesse che le contengono.

I fisici, ovviamente, non danno per scontate le barre di ferro.

Essi si chiedono perché siano rigide, e continuano a discendere nella gerarchia per molti altri livelli ancora, sino a quelli delle particelle elementari e dei quark. Ma la vita è troppo breve perché la maggior parte di noi sia disposta a seguirli in questa loro ricerca di spiegazione. Per ogni livello dato di un'organizzazione complessa si possono conseguire normalmente spiegazioni soddisfacenti se si scende nella gerarchia di uno o due livelli al di sotto di quello che si sta considerando, ma non

di più. Il comportamento di un'automobile viene spiegato in termini di cilindri, carburatore e candele. È vero che ciascuno di questi componenti poggia su una piramide di spiegazioni a livelli inferiori. Se però mi chiedeste come funziona un'automobile, mi giudichereste un po' pomposo se rispondessi nei termini delle leggi di Newton e delle leggi della termodinamica, e decisamente oscuro se rispondessi nei termini delle particelle fondamentali. È senza dubbio vero che, al più basso dei vari livelli, il funzionamento di un'automobile si spiega nei termini di interazioni fra le particelle elementari, ma è molto più semplice spiegarlo nei termini di interazioni fra pistoni, cilindri e candele.

Il funzionamento di un computer può essere spiegato nei termini di interazioni fra porte logiche elettroniche a semiconduttori, e il comportamento di queste, a loro volta, è spiegato dai fisici a livelli ancora inferiori. Per la maggior parte dei fini, però, sprecheremmo in gran parte il nostro tempo se tentassimo di capire il comportamento dell'intero computer all'uno o all'altro di questi livelli, troppo grande essendo il numero delle porte logiche e delle interconnessioni fra loro. Una spiegazione soddisfacente dev'essere nei termini di un numero di interazioni abbastanza piccolo da poter essere padroneggiato senza difficoltà.

Ecco perché, se vogliamo capire il funzionamento dei computer, preferiamo una spiegazione preliminare nei termini di una mezza dozzina di subcomponenti principali: memoria, processore, memoria ausiliaria, unità di controllo, gestore di inputoutput ecc. Dopo avere compreso le interazioni fra la mezza dozzina di componenti principali, può venirci il desiderio di porre domande sull'organizzazione interna di questi componenti principali. È probabile che solo tecnici specializzati discendano al livello delle porte and e nor, e solo i fisici si spingeranno ancor oltre, al livello di come gli elettroni si comportano in un mezzo semiconduttivo.

Per coloro che amano i tipi di nomi in «ismo», il nome più adatto per designare il mio approccio al problema di capire come funzionano le cose è probabilmente «riduzionismo gerarchico». Chi è abituato a leggere riviste di cultura può aver notato che il «riduzionismo» è una di quelle cose, come il peccato, che vengono menzionate solo da coloro che le combattono.

Designare se stesso come un riduzionista è un po', in certi ambienti, come ammettere di mangiare bambini. Ma come in realtà non c'è nessuno che mangi bambini, così nessuno è veramente un riduzionista in un qualsiasi senso contro cui valga la pena di prendere posizione. Il riduzionista inesistente - il tipo a cui tutti si oppongono, ma che esiste solo nella loro immaginazione - cerca di spiegare le cose complicate direttamente nei termini delle parti più piccole, e persino, in alcune versioni del mito, come la somma delle parti! Il riduzionista gerarchico, invece, spiega un'entità complessa, a un qualsiasi livello particolare nella gerarchia dell'organizzazione, nei termini di entità che si trovano solo un livello più in basso nella gerarchia; entità che sono probabilmente a loro volta abbastanza complesse da esigere un'ulteriore riduzione alle loro parti componenti; e via dicendo.

Non occorre dire - anche se si ritiene che il riduzionista mitico, che mangia i bambini, lo neghi - che i tipi di spiegazione che sono adatti ai livelli superiori nella gerarchia sono del tutto diversi dai tipi di spiegazione che sono adatti a livelli inferiori. Ecco perché le automobili si prestano a essere spiegate nei termini di carburatori ma non nei termini di quark. Ma il riduzionista gerarchico crede che i carburatori si spieghino a loro volta nei termini di unità minori, le quali si spiegano nei termini di unità ancora minori, le quali si spiegano in ultima analisi nei termini delle più piccole fra le particelle elementari. Il riduzionismo, in questo senso, è solo un altro nome per designare un onesto desiderio di capire come funzionino le cose.

Abbiamo cominciato quest'ultima parte del capitolo chiedendoci quale tipo di spiegazione di cose complicate ci soddisferebbe. Abbiamo appena considerato la questione dal punto di vista del meccanicismo: come funziona? Abbiamo concluso che il comportamento di una cosa complicata dovrebbe essere spiegato nei termini di interazioni fra le parti che la compongono, considerate come livelli successivi di una gerarchia ordinata.

Ma un altro tipo di problema è in che modo la cosa complicata abbia avuto origine. È questo il problema alla cui soluzione è dedicato quest'intero libro, cosicché non è il caso che io mi dilunghi qui molto oltre su questo punto. Menzionerò solo che si applica qui lo stesso principio generale che abbiamo già visto a proposito del meccanismo della comprensione. Una cosa complicata è una cosa

così «improbabile» che non ci sentiamo inclini a darne per scontata l'esistenza. Essa non avrebbe potuto venire all'esistenza in conseguenza di un singolo atto casuale. Noi spiegheremo il suo venire all'essere come una conseguenza di trasformazioni graduali, cumulative, passo-passo, da cose più semplici, da oggetti primordiali abbastanza semplici da potere aver avuto origine per caso. Esattamente come un «riduzionismo a grandi passi» non può funzionare come spiegazione di un meccanismo, e dev'essere sostituito da una serie di piccoli passi graduali da un livello della gerarchia all'altro, così non possiamo spiegare una cosa complessa come se avesse avuto origine in un singolo passo. Dobbiamo di nuovo far ricorso a una serie di piccoli passi, questa volta disposti in sequenza nel tempo.

Nel suo libro, scritto splendidamente, *La creazione*, il chimico e fisico di Oxford Peter Atkins comincia così: Io condurrò la vostra mente in un viaggio. È un viaggio a vasto raggio, che ci porta ai confini dello spazio, del tempo e della comprensione. Nel corso di questo viaggio io sosterrò che non c'è niente che non possa essere capito, niente che non possa essere spiegato, e che tutto è straordinariamente semplice... Gran parte dell'universo non abbisogna di alcuna spiegazione. Gli elefanti, per esempio. Una volta che le molecole hanno imparato a competere fra loro e a creare altre molecole a loro immagine, elefanti, e cose simili agli elefanti, si troveranno a tempo debito a vagare attraverso le savane.

Atkins suppone che l'evoluzione di cose complesse - l'argomento di questo libro - sia inevitabile una volta che si siano affermate le condizioni fisiche appropriate. Egli si chiede quali siano le minime condizioni fisiche necessarie, quale sia la quantità minima di lavoro di progettazione che un Creatore pigro dovrebbe fare per essere certo che l'universo, e in seguito elefanti e altre cose complesse, venissero un giorno all'esistenza. La risposta, dal suo punto di vista di scienziato fisico, è che il Creatore potrebbe essere infinitamente pigro. Le unità fondamentali originarie che noi abbiamo bisogno di postulare per comprendere il venire all'esistenza di qualcosa, o consistono letteralmente in nulla (secondo alcuni fisici) o (secondo altri fisici) sono unità di una semplicità estrema, troppo semplici per aver bisogno di una cosa così grandiosa come una Creazione deliberata.

Atkins dice che gli elefanti e le cose complesse non hanno bisogno di alcuna spiegazione. Ma lo dice perché è uno scienziato fisico, che dà per scontata la teoria dell'evoluzione dei biologi. Egli non intende dire realmente che gli elefanti non abbiano bisogno di una spiegazione, ma piuttosto che gli basta che i biologi siano in grado di spiegare gli elefanti purché sia consentito loro di dare per scontati alcuni fatti della fisica. Il suo compito come scienziato fisico, perciò, è quello di giustificare la nostra decisione di dare quei fatti per scontati. Ed egli riesce ad assolvere questo compito. La mia posizione è complementare. Io sono un biologo. Io do per scontati i fatti della fisica, i fatti del mondo della semplicità. Se i fisici non sono ancora d'accordo fra loro sul problema se quei fatti semplici siano stati o no ancora compresi, questo non è affar mio. Il mio compito è quello di spiegare gli elefanti, e il mondo delle cose complesse, nei termini delle cose semplici che i fisici capiscono o su cui stanno lavorando. Il problema del fisico è il problema delle origini ultime e delle leggi naturali ultime. Il problema del biologo è invece il problema della complessità. Il biologo cerca di spiegare il funzionamento, e il venire all'esistenza, delle cose complesse nei termini di cose più semplici. Egli può considerare assolto il suo compito quando arriva a entità così semplici da poterle lasciare tranquillamente ai fisici.

Mi rendo ben conto che la mia caratterizzazione di un oggetto complesso - statisticamente improbabile in una direzione che non è specificata retrospettivamente - può sembrare estremamente personale. E altrettanto personale può sembrare la mia caratterizzazione della fisica come lo studio della semplicità. Se il lettore preferisse qualche altro modo per definire la complessità, per me andrebbe bene lo stesso e sarei ben lieto di accettare la sua definizione ai fini della discussione. Ma una cosa a cui tengo molto è che, comunque decidiamo di chiamare la qualità di «essere statisticamente improbabile in una direzione specificata senza l'aiuto del senno di poi», essa è una qualità importante che richiede uno speciale sforzo di spiegazione. È la qualità che caratterizza gli oggetti biologici come opposti agli oggetti della fisica. Il tipo di spiegazione che troveremo non dovrà essere in contraddizione con le leggi della fisica. Esso si servirà in effetti delle leggi della

fisica, e di nient'altro che delle leggi della fisica. Esso utilizzerà le leggi della fisica in un modo speciale che non è quello discusso di solito nei testi di fisica.

Quel modo speciale è il modo di Darwin. Io ne introdurrò l'essenza fondamentale nel capitolo III sotto il titolo di selezione cumulativa.

Frattanto vorrei seguire Paley nel sottolineare la grandezza del problema che la nostra spiegazione si trova a dover affrontare, la mera grandezza della complessità biologica e la bellezza ed eleganza del progetto biologico. Il capitolo II è un'estesa discussione di un esempio particolare, il «radar» nei pipistrelli, scoperto molto tempo dopo il tempo di Paley. E qui, in questo capitolo, ho incluso un'illustrazione. Paley avrebbe sicuramente amato molto il microscopio elettronico! - di un occhio, assieme a due «zuate» successive su suoi dettagli. In alto è presentata una sezione dell'occhio stesso. Questo livello di ingrandimento mostra l'occhio come uno strumento ottico. La somiglianza con la macchina fotografica è evidente. Il diaframma dell'iride, la pupilla, è responsabile della variazione costante dell'apertura. La lente cristallina (o cristallino), che in realtà è solo una parte di un sistema diottrico composto, è responsabile della parte variabile della messa a fuoco. Il fuoco viene modificato comprimendo il cristallino con muscoli (o, nel camaleonte, muovendo il cristallino stesso in avanti o all'indietro, come in una macchina fotografica). L'immagine cade sulla parte posteriore della retina, dove eccita delle fotocellule.

La parte al centro della figura 1 presenta un ingrandimento di una piccola sezione della retina. La luce proviene da sinistra.

Le cellule sensibili alla luce («fotocellule») non sono la prima cosa colpita dalla luce, ma sono sepolte all'interno e rivolte dalla parte opposta a quella della luce. Su questa stranezza torneremo più avanti. La prima cosa colpita dalla luce è, in effetti, lo strato di cellule gangliari, che costituiscono l'«interfaccia elettronica» fra le fotocellule e il cervello. In realtà le cellule gangliari sono responsabili della pre-elaborazione dell'informazione in modi complessi prima della sua trasmissione al cervello, e sotto qualche aspetto la parola «interfaccia» non rende ragione di questo stato di cose. «Computer satellite» potrebbe essere una denominazione più appropriata. I fili provenienti dalle cellule gangliari decorrono lungo la superficie della retina sino alla «macchia cieca», dove si internano nella retina a formare il principale cavo di collegamento col cervello, il nervo ottico.

Nell'«interfaccia elettronica», che raccoglie dati da circa 125 milioni di fotocellule, si trovano circa tre milioni di cellule gangliari.

In basso c'è una fotocellula ingrandita, un bastoncello. Mentre osserviamo l'architettura fine di questa cellula dobbiamo tener presente che tutta questa complessità si ripete 125 milioni di volte in ciascuna retina. E una complessità comparabile si ripete bilioni di volte altrove nel corpo nel suo complesso. La cifra di 125 milioni di fotocellule è circa 5000 volte maggiore del numero di punti risolvibili singolarmente in una fotografia di rivista di buona qualità. Le membrane ripiegate nella parte a destra della fotocellula qui illustrata sono le strutture che raccolgono la luce. La loro forma stratificata accresce l'efficienza della fotocellula nella cattura di fotoni, le particelle fondamentali da cui è formata la luce. Se un fotone non viene catturato dalla prima membrana, può venire catturato dalla seconda, e via dicendo. In conseguenza di ciò, alcuni occhi sono capaci di scoprire un singolo fotone. Le emulsioni più rapide e sensibili disponibili ai fotografi hanno bisogno di un numero di fotoni circa 25 volte superiore per scoprire un punto di luce. Gli oggetti in forma di losanghe nella sezione mediana della cellula sono per lo più mitocondri. I mitocondri non si trovano solo nelle fotocellule, ma anche nella maggior parte delle altre cellule. Ciascuno di essi può essere concepito come uno stabilimento chimico che, nel corso della fabbricazione del suo prodotto primario di energia utilizzabile, lavora più di 700 sostanze chimiche diverse in lunghe linee di montaggio interconnesse, distribuite lungo la superficie delle sue membrane interne ripiegate in modi complessi. Il globulo di forma circolare alla sinistra della figura 1 in basso è il nucleo. Anche il nucleo è una struttura comune a tutte le cellule animali e vegetali. Ogni nucleo, come vedremo nel capitolo V, contiene una banca dati codificata in modo digitale e più vasta, come contenuto di informazione, dell'insieme di tutte trenta i volumi dell' Encyclopaedia Britannica. E questa cifra vale per ogni cellula, e non per l'insieme di tutte le cellule che compongono un corpo.

Il bastoncello nella parte bassa della figura è una singola cellula. Il numero totale di cellule del corpo (di un essere umano) è di circa 10 bilioni. Quando mangiamo una bistecca, mastichiamo l'equivalente di più di 100 miliardi di copie dell'Encyclopaedia Britannica.

II

Progetto razionale

La selezione naturale è l'orologiaio cieco, cieco perché non vede dinanzi a sé, non pianifica conseguenze, non ha in vista alcun fine. Eppure i risultati viventi della selezione naturale ci danno un'impressione molto efficace dell'esistenza di un disegno intenzionale di un maestro orologiaio; che alla base della complessità della natura vivente ci sia un disegno intenzionale e un progetto è però solo un'illusione. L'obiettivo di questo libro è quello di risolvere questo paradosso con soddisfazione del lettore, e il fine di questo capitolo è quello di rendere il lettore ancora più consapevole dell'illusione del disegno. Considereremo un esempio particolare e concluderemo che, nel prospettare la complessità e la bellezza del disegno, Paley rimase molto lontano dal concepirle e presentarle in modo adeguato.

Possiamo dire che un corpo vivente o un organo è ben progettato se ha attributi che un ingegnere intelligente e competente avrebbe potuto dargli per conseguire un qualche fine ragionevole, come quelli di permettergli di volare, nuotare, vedere, mangiare, riprodursi o, più in generale, di promuovere la sopravvivenza e la replica dei geni dell'organismo. Non è necessario supporre che il progetto di un corpo o di un organo sia il migliore che un ingegnere potesse concepire. Spesso la cosa migliore che un ingegnere può fare è, in ogni caso, superata dalla cosa migliore che può fare un altro ingegnere, specialmente nel caso che il secondo viva in un periodo posteriore della storia della tecnologia. Ogni ingegnere è però in grado di riconoscere un oggetto che sia stato progettato, anche se in modo mediocre, in vista di un fine, e di solito è in grado di accertare quale sia tale fine semplicemente osservando la struttura dell'oggetto. Nel capitolo I ci siamo occupati per lo più di aspetti filosofici. In questo capitolo svilupperò un particolare esempio concreto che credo impressionerà qualsiasi ingegnere, ossia il sonar («radar») nei pipistrelli. Nello spiegare ciascun punto comincerò ponendo un problema che la macchina vivente deve fronteggiare; poi considererò le possibili soluzioni del problema che un ingegnere intelligente potrebbe considerare; e infine illustrerò la soluzione adottata in realtà dalla natura.

Quest'unico caso preso in esame è ovviamente solo un esempio.

Se un ingegnere rimane impressionato dai pipistrelli, resterà impressionato da innumerevoli altri esempi di progettazione negli esseri viventi.

I pipistrelli hanno un problema: come orientarsi al buio. Essi escono a caccia di notte e non possono usare la luce come aiuto per trovare le loro prede e per evitare ostacoli. Qualcuno potrebbe dire che, se questo è un problema, se lo sono creato loro, e che potrebbero evitarlo cambiando semplicemente le loro abitudini e andando a caccia di giorno. Ma le risorse delle ore di luce sono già massicciamente sfruttate da altre creature, come per esempio gli uccelli. Poiché di notte sono disponibili delle risorse, e poiché quelle diurne sono già monopolizzate da altri, la selezione naturale favorì quelli fra i pipistrelli che praticavano la caccia notturna. È ovviamente probabile che le attività notturne risalgano a un passato lontano, fino ai progenitori di tutti i mammiferi attuali.

Quando i dinosauri dominavano l'economia diurna, i mammiferi nostri progenitori riuscirono probabilmente a sopravvivere solo perché trovarono modi per procurarsi di notte i loro mezzi di sostentamento. Solo dopo la misteriosa estinzione in massa dei dinosauri, circa 65 milioni di anni fa, i nostri antenati furono in grado di emergere in numero consistente alla luce del giorno.

Tornando ai pipistrelli, essi hanno un problema di ingegneria: come orientarsi e trovare le loro prede in assenza di luce. I pipistrelli non sono gli unici animali a dover fronteggiare queste difficoltà oggi. È chiaro che anche gli insetti notturni su cui essi esercitano la predazione devono trovare in qualche modo la loro via. I pesci e i cetacei che vivono negli abissi marini dispongono di poca o niente luce di giorno o di notte perché i raggi del sole non possono penetrare molto in profondità al di sotto

della superficie. Pesci e delfini che vivono in acque estremamente fangose non possono vedere perché la luce, pur essendo presente, è intercettata e diffusa dalle particelle in sospensione nell'acqua. Molti altri animali moderni si procurano i mezzi di sostentamento in condizioni in cui la visione è difficile o impossibile.

Dato il problema di come manovrare al buio, quali soluzioni potrebbe considerare un ingegnere? La prima che potrebbe venirgli in mente è quella di produrre in qualche modo della luce, di usare una lanterna o un fascio di luce. Le lucciole e qualche pesce (di solito con l'aiuto di batteri) hanno il potere di prodursi da sé la luce di cui hanno bisogno, ma pare che questo processo consumi una grande quantità di energia. Le lucciole di sesso maschile usano la loro luce per attrarre le femmine. Quest'uso della luce non richiede una quantità di energia proibitiva: in una notte buia la luce di un maschio, non più grande della capocchia di uno spillo, può essere vista a distanza da una femmina, i cui occhi sono esposti direttamente alla sorgente di luce stessa. L'uso della luce per orientarsi nell'ambiente richiede invece un dispendio di energia molto più elevato, poiché gli occhi devono scoprire la minuscola frazione della luce che viene riflessa da ogni parte della scena. La sorgente di luce dev'essere perciò immensamente più luminosa per poter essere usata come un faro per illuminare la via che non per essere usata semplicemente come segnale per attrarre altri individui della stessa specie. In ogni caso, sia o no la ragione il dispendio di energia, pare che, con la possibile eccezione di qualche strano pesce degli abissi marini, nessun animale a parte l'uomo usi la luce per illuminare l'ambiente in cui si muove.

Che cos'altro potrebbe escogitare il nostro ipotetico ingegnere? A volte i ciechi sembrano avere uno strano senso degli ostacoli presenti sul loro cammino. Si è parlato in proposito di «visione facciale» perché dei ciechi hanno riferito che questa sensazione assomiglia un po' a una sensazione tattile sulla faccia. Un autore ha riferito su un bambino totalmente cieco che riusciva ad andare a buona velocità col suo triciclo intorno al palazzo vicino alla sua casa, servendosi della «visione facciale». Degli esperimenti dimostrarono che, in realtà, la «visione facciale» non ha niente a che fare col tatto o con la parte frontale della faccia benché la sensazione possa essere riferita alla parte anteriore del viso, esattamente come una persona cui sia stata amputata una gamba può sentire dolore alla punta del piede.

Pare che in realtà la sensazione della «visione facciale» venga ottenuta attraverso le orecchie. Le persone cieche, senza rendersene conto a livello cosciente, percepiscono la presenza di ostacoli per mezzo di echi, dei loro passi o di altri suoni. Prima che venisse compiuta questa scoperta, degli ingegneri avevano già costruito degli strumenti per sfruttare questo principio, per esempio per misurare la profondità del mare sotto una nave.

Dopo l'invenzione di questa tecnologia, fu solo questione di tempo prima che i progettisti di armi la adattassero al problema del rilevamento di sottomarini. Nel corso della Seconda guerra mondiale entrambe le parti fecero un uso massiccio di questi dispositivi di rilevamento sotto nomi in codice come asdic (Gran Bretagna) e sonar (Stati Uniti), oltre che della tecnologia simile del radar (Stati Uniti) o dell'rdf (Gran Bretagna), che usano echi radio anziché echi acustici.

Benché i pionieri del Sonar e del Radar non se ne rendessero allora conto, oggi tutti sanno che i pipistrelli, o piuttosto la selezione naturale lavorando sui pipistrelli, avevano perfezionato il sistema decine di milioni di anni prima e che il loro radar ottiene risultati di rilevamento e di navigazione che riempirebbero di ammirazione un ingegnere. È tecnicamente scorretto parlare di «radar» dei pipistrelli, dato che essi non usano onde radio. Si tratta invece di un sonar. Ma le teorie matematiche che sono alla base del radar e del sonar sono molto simili, e gran parte della nostra comprensione scientifica dei particolari di che cosa fanno i pipistrelli deriva dall'applicazione al loro comportamento della teoria del radar. Lo zoologo americano Donald Griffin, al quale si deve in gran parte la scoperta del sonar nei pipistrelli, coniò il termine di «ecolocazione» per designare tanto il sonar quanto il radar, usati tanto da animali quanto da strumenti umani. In pratica pare che la parola venga usata soprattutto in riferimento al sonar animale.

È sbagliato parlare dei pipistrelli come se fossero tutti uguali.

È come se facessimo tutt'un fascio di cani, leoni, donnole, orsi, iene, panda e lontre, solo perché sono tutti carnivori. Vari gruppi di pipistrelli usano il sonar in modi radicalmente diversi, e

sembrano averlo inventato separatamente e in modo autonomo, esattamente come britannici, tedeschi e americani svilupparono tutti indipendentemente il radar. Non tutti i pipistrelli usano l'ecolocazione. I pipistrelli frugivori tropicali del Vecchio Mondo hanno una buona vista, e la maggior parte di essi usano per orientarsi solo gli occhi. Una o due specie di pipistrelli frugivori, però, per esempio le rossette (*Rousettus*), sono capaci di volare in un'oscurità totale, in cui gli occhi, per quanto buoni, non devono essere in grado di vedere. Usano il sonar, ma è un tipo di sonar più rozzo di quello usato dai pipistrelli più piccoli che ci sono familiari nelle regioni temperate. La rossetta fa schioccare ritmicamente la lingua mentre vola, producendo un forte clic, e naviga misurando l'intervallo di tempo che intercorre fra ogni clic e l'eco di ritorno. Buona parte dei clic della rossetta sono chiaramente percepibili anche da noi: si tratta dunque, per definizione, di suoni e non di ultrasuoni (gli ultrasuoni sono semplicemente suoni troppo alti per essere percepibili dall'orecchio umano).

In teoria, quanto più alto è il tono di un suono, tanto maggiore è la sua precisione ai fini del rilevamento di un oggetto. Ciò dipende dal fatto che i suoni più bassi hanno una lunghezza d'onda maggiore, la quale non consente di risolvere la differenza fra oggetti vicini fra loro. A parità di tutto il resto, quindi, un missile che usasse l'ecolocazione come sistema di guida dovrebbe produrre idealmente suoni molto alti. La maggior parte dei pipistrelli usano in effetti suoni estremamente alti, troppo alti perché gli esseri umani possano percepirli: ultrasuoni. A differenza della rossetta, che ha una vista eccellente e che usa suoni relativamente bassi non modulati per integrare la sua buona vista con una modesta attività di ecolocazione, i pipistrelli più piccoli sembrano essere macchine per l'ecolocazione molto avanzate. Essi hanno occhi minuscoli che, nella maggior parte dei casi, probabilmente non vedono molto bene. Vivono in un mondo di echi, e il loro cervello è presumibilmente in grado di usare tali echi per conseguire qualcosa di affine alla «visione» di immagini, anche se per noi è quasi impossibile «visualizzare» come potrebbero essere tali immagini. I rumori da loro prodotti non sono solo leggermente troppo alti per poter essere uditi da noi, come una sorta di superfischietto per cani, ma in molti casi sono molto più alti della nota più alta che chiunque abbia udito o che possa immaginare. Per inciso, è una fortuna che non possiamo udirli, poiché sono immensamente potenti e ci assordirebbero, oltre a renderci impossibile il sonno. Questi pipistrelli sono come aerei spia in miniatura, irti di strumenti raffinatissimi. Il loro cervello è un complesso delicatamente sintonizzato di elettronica miniaturizzata, programmato col software necessario per decodificare un mondo di echi in tempo reale. Il loro muso assume spesso forme mostruose, simili ai mostri rappresentati nei doccioni di cattedrali gotiche, le quali ci appaiono orrende finché non le vediamo per ciò che realmente sono, ossia strumenti foggiate con estrema precisione per inviare ultrasuoni nelle direzioni desiderate.

Anche se non riusciamo a udire direttamente gli impulsi a ultrasuoni di questi pipistrelli, possiamo farci un'idea di quel che sta accadendo per mezzo di una macchina traduttrice o «rivelatore di pipistrelli», un bat-detector. Questa macchina riceve gli impulsi attraverso uno speciale microfono per ultrasuoni e traduce ciascun impulso in un clic udibile, ossia in un suono che possiamo udire attraverso cuffie acustiche. Se portiamo un tale rivelatore di pipistrelli in una radura su cui svolazzano pipistrelli in cerca di cibo, udiremo quando ogni impulso viene emesso, anche se non potremo farci un'idea precisa di quale sia il «suono» reale di tali impulsi. Se il nostro pipistrello è un *Myotis*, uno dei piccoli pipistrelli bruni comuni, mentre svolazza in una missione di routine udremo un susseguirsi di clic con la frequenza di una decina al secondo. Questo è pressa poco il ritmo di funzionamento di una telescrivente standard, o di un mitragliatore Bren.

È presumibile che l'immagine che il pipistrello ha del mondo in cui si muove venga aggiornata dieci volte al secondo. La nostra immagine visiva pare venga aggiornata in modo continuo finché teniamo aperti gli occhi. Possiamo farci un'idea di cosa voglia dire avere un'immagine del mondo aggiornata a intermittenza, come quella dei pipistrelli, usando uno stroboscopio di notte. Qualcosa del genere si fa talvolta nelle discoteche, e gli effetti che si ottengono sono molto vistosi. Una persona che balla ci appare come una successione di pose statuarie irrigidite. È chiaro che, quanto maggiore è la velocità che conferiamo allo stroboscopio, tanto più l'immagine corrisponderà alla visione normale «continua». Una visione stroboscopica a circa dieci immagini al secondo, ossia a

un ritmo corrispondente a quello dell'attività di ecolocazione del pipistrello in volo, sarebbe quasi altrettanto buona della visione normale «continua» ai fini delle nostre normali esigenze quotidiane, anche se non al fine di prendere al volo una palla o un insetto.

Questa è esattamente la frequenza dei rilevamenti di un pipistrello mentre svolazza di notte a caccia di insetti. Quando un piccolo pipistrello *Myotis* rileva la presenza di un insetto e comincia a muoversi su una rotta di intercettazione, la frequenza dei suoi clic aumenta. Più rapida di una mitragliatrice, può raggiungere frequenze massime di 200 impulsi al secondo quando infine il pipistrello si avvicina al suo bersaglio mobile. Per simulare questa situazione, noi dovremmo accelerare il nostro stroboscopio al punto che i suoi lampi abbiano una rapidità doppia di quella dei cicli dell'elettricità domestica, cicli che non percepiamo in una lampada al neon. È chiaro che noi non avremmo alcuna difficoltà a eseguire tutte le nostre normali funzioni visive, nemmeno a giocare a tennis o a ping-pong, in un mondo visuale in cui la luce «pulsasse» con una frequenza così elevata. Se possiamo immaginare che il cervello del pipistrello costruisce un'immagine del mondo analoga alle nostre immagini visive, la frequenza degli impulsi da sola sembra suggerire che l'immagine che il pipistrello si forma dell'ambiente col suo sistema di ecolocazione possa essere dettagliata e continua almeno quanto la nostra immagine visiva. Ovviamente possono esserci altre ragioni per le quali essa potrebbe non essere così dettagliata come la nostra immagine visiva. Se i pipistrelli sono in grado di accelerare la frequenza dei loro clic ultrasonici fino a 200 impulsi al secondo, perché non mantengono questa frequenza per tutto il tempo? Visto che posseggono a quanto pare una «manopola» per il controllo del loro «stroboscopio», perché non lo tengono in permanenza al massimo, col vantaggio di avere di continuo una percezione molto fine del mondo, e di essere quindi in grado di far fronte a qualsiasi emergenza? Una ragione consiste nel fatto che queste frequenze elevate sono adatte solo per bersagli vicini. Se un impulso segue a un intervallo di tempo troppo ravvicinato all'impulso precedente, si confonde con la sua eco riflessa da un bersaglio lontano. Ma anche se così non fosse, ci sarebbero probabilmente buone ragioni economiche per non mantenere per tutto il tempo la frequenza di impulsi massima. Produrre impulsi a ultrasuoni molto forti dev'essere costoso, in termini di energia, di usura della voce e delle orecchie, e forse anche in «tempo di computer».

Un cervello impegnato a elaborare 200 echi distinti al secondo potrebbe non trovare quella capacità in eccedenza che si richiede per pensare a qualcos'altro. Persino il ritmo minimo di circa dieci impulsi al secondo dev'essere piuttosto costoso, ma lo è certamente molto meno della frequenza massima di 200 al secondo. Un singolo pipistrello che accelerasse la frequenza dei suoi impulsi dovrebbe pagare un prezzo aggiuntivo di energia ecc., che non sarebbe giustificato dall'accresciuto potere risolutivo del suo sonar. Quando l'unico oggetto in movimento nell'ambiente immediato è il pipistrello stesso, il mondo apparente è abbastanza simile in decimi di secondo successivi da non richiedere una maggiore frequenza di rilevamento. Quando però nell'ambiente immediato c'è un altro oggetto in movimento, in particolare un insetto in volo che cambia frequentemente direzione, scendendo a volte anche in picchiata verso il suolo in un disperato tentativo di liberarsi del suo inseguitore, il beneficio extra che il pipistrello ottiene intensificando la frequenza degli impulsi giustifica ampiamente il costo accresciuto. Ovviamente le considerazioni di costi e benefici in questo paragrafo sono del tutto congetturali ma devono quasi certamente corrispondere in qualche misura alla realtà.

L'ingegnere che si accinge a progettare un apparecchio sonar o radar efficiente viene a trovarsi ben presto di fronte a un problema, connesso al bisogno di rendere gli impulsi estremamente forti. Questi devono essere forti perché, quando viene emesso un suono, il suo fronte d'onda avanza come una sfera che si espande di continuo. L'intensità del suono si distribuisce e, in un certo senso, si «diluisce» sull'intera superficie della sfera. La superficie di qualsiasi sfera è proporzionale al quadrato del raggio. Man mano che il fronte d'onda avanza e la sfera si espande, l'intensità del suono in ogni punto particolare della sfera diminuisce perciò non in proporzione alla distanza (al raggio) bensì al quadrato della distanza dalla sorgente del suono. Ciò significa che l'intensità del suono diminuisce abbastanza rapidamente man mano che esso si allontana dalla sua sorgente, ossia in questo caso dal pipistrello.

Quando questo suono diluito colpisce un oggetto, per esempio un insetto in volo, ne viene riflesso. Il suono riflesso si irraggia a sua volta a partire dall'insetto in un fronte d'onda sferico in espansione. Per la stessa ragione che abbiamo visto per l'impulso sonoro originario, anche questo suono si indebolisce in proporzione al quadrato della distanza dalla sua sorgente, ossia dall'insetto. Quando l'eco perviene al pipistrello, la diminuzione della sua intensità è proporzionale non alla distanza dell'insetto dal pipistrello, e neppure al quadrato della distanza, ma a qualcosa di più del quadrato del quadrato - ossia della quarta potenza - della distanza. Ciò significa che esso è ora molto debole. Il problema potrebbe essere in parte risolto nel caso che il pipistrello riuscisse a dirigere il suono per mezzo dell'equivalente di un megafono, cosa che è possibile però solo se esso conosce già la direzione del bersaglio. In ogni caso, se il pipistrello deve ricevere un'eco ragionevole da un bersaglio lontano, lo stridio che esso emette dev'essere molto forte, e lo strumento che ne percepisce l'eco, ossia l'orecchio, molto sensibile a suoni molto deboli, gli echi. Le grida dei pipistrelli, come ho detto, sono in effetti assai forti, e le loro orecchie sensibilissime.

Ora, ecco il problema che dovrebbe essere risolto dall'ingegnere che cercasse di progettare una macchina simile al pipistrello. Se il microfono, o orecchio, è molto sensibile, rischia di essere gravemente danneggiato dagli impulsi sonori emessi dal pipistrello stesso, che sono fortissimi. Non è una buona soluzione tentare di risolvere questo problema riducendo la forza dei suoni, poiché in questo caso gli echi risulterebbero troppo deboli per poter essere percepiti. E neppure sarebbe una buona soluzione se tentassimo di risolvere questo secondo problema rendendo più sensibile il microfono (l'«orecchio»); in questo caso, infatti, otterremmo solo il risultato di renderlo più vulnerabile a danni da parte dei suoni, anche se ora leggermente più deboli, prodotti dal pipistrello! Questo dilemma è connesso intrinsecamente alla forte differenza di intensità fra i suoni in uscita e l'eco di ritorno, una differenza che è imposta inesorabilmente dalle leggi della fisica.

Quale altra soluzione potrebbe escogitare l'ingegnere? Quando un problema analogo si pose ai progettisti dei radar nella Seconda guerra mondiale, essi trovarono una soluzione adeguata in un dispositivo di commutazione. I segnali radar venivano emessi in impulsi necessariamente molto potenti che avrebbero potuto danneggiare le antenne molto sensibili in attesa dei deboli echi di ritorno. Il dispositivo di commutazione staccava temporaneamente il ricevitore dell'antenna subito prima della trasmissione dell'impulso, dopo di che staccava il trasmettitore sino all'emissione dell'impulso successivo, attivando di nuovo l'antenna in tempo per ricevere l'eco.

I pipistrelli svilupparono la tecnologia della commutazione trasmissione-ricezione molto tempo fa, probabilmente milioni di anni prima che i nostri progenitori scendessero dagli alberi.

Il loro dispositivo di commutazione funziona nel modo seguente. Nelle orecchie dei pipistrelli, come nelle nostre, il suono viene trasmesso dal timpano alle cellule microfoniche, sensibili al suono, per mezzo di un ponte formato da tre ossicini noti come il martello, l'incudine e la staffa. La disposizione e articolazione di questi tre ossicini, per inciso, è esattamente come avrebbe potuto essere progettata da un ingegnere dell'alta fedeltà per assolvere una funzione di «adattamento di impedenza», ma questa è un'altra storia. Quel che ci interessa qui è che alcuni pipistrelli hanno muscoli ben sviluppati inseriti sulla staffa e sul martello. Quando questi muscoli vengono contratti, le ossa non trasmettono più il suono in modo efficiente, un po' come se neutralizzassimo un microfono premendo il pollice contro il suo diaframma per impedirgli di vibrare. Il pipistrello è capace di usare questi muscoli per sconnettere temporaneamente le sue orecchie. I muscoli si contraggono subito prima dell'emissione di ogni impulso, preservando in tal modo le orecchie da ogni danno, dopo di che tornano a rilassarsi, consentendo all'orecchio di tornare alla sua sensibilità massima giusto in tempo per ricevere l'eco di ritorno. Questo sistema di commutazione fra la trasmissione e la ricezione funziona solo se si mantiene una precisione rigorosissima nei tempi anche in frazioni di secondo molto piccole. I pipistrelli del genere *Tadarida* sono capaci di contrarre e rilassare alternativamente i muscoli del loro sistema di commutazione 50 volte al secondo, mantenendosi in perfetta sincronia col crepitio degli impulsi di ultrasuoni. Questa è una prestazione notevolissima, paragonabile a un dispositivo usato in alcuni aerei da caccia durante la Prima guerra mondiale. Le loro mitragliatrici sparavano «attraverso» l'elica grazie a una perfetta sincronizzazione con la rotazione dell'elica stessa, così che le pallottole riuscivano sempre a passare fra le pale in

movimento senza mai colpirle.

Il problema successivo che potrebbe presentarsi ai nostri ingegneri è questo: se il dispositivo sonar determina la distanza dei bersagli misurando la durata del silenzio fra l'emissione di un suono e la sua eco di ritorno (è questo il metodo che sembrano usare, in effetti, le rossette) i suoni dovrebbero essere a impulsi molto brevi, discontinui. Un suono di lunga durata sarebbe infatti ancora in corso al ritorno dell'eco e, anche se parzialmente smorzato dai muscoli del sistema di commutazione, ostacolerebbe il rilevamento dell'eco stessa. Idealmente, a quanto pare, gli impulsi emessi dai pipistrelli dovrebbero essere quindi effettivamente molto brevi. Ma quanto più un suono è breve, tanto più difficile è renderlo abbastanza energico per produrre un'eco soddisfacente. Eccoci dunque, a quanto pare, di fronte alla necessità di un altro compromesso con le leggi della fisica. Agli ingegneri potrebbero venire in mente due soluzioni, e ciò fu in realtà quanto avvenne quando si trovarono a dover affrontare lo stesso problema, ancora una volta nel caso analogo del radar. Delle due soluzioni può essere preferibile l'una o l'altra a seconda che sia più importante misurare la distanza dell'oggetto dallo strumento o la sua velocità relativamente allo strumento. La prima soluzione è quella nota ai tecnici dei radar come radar chirp, o «radar a modulazione di frequenza». Possiamo pensare i segnali radar come una serie di impulsi, ma ciascun impulso ha una cosiddetta frequenza portante. Questa è analoga all'«altezza» di un impulso di suoni o ultrasuoni.

Le grida dei pipistrelli, come abbiamo visto, hanno un ritmo di ripetizione di impulsi a decine o centinaia al secondo. Ognuno di tali impulsi ha una frequenza portante da decine di migliaia a centinaia di migliaia di cicli al secondo. Ogni impulso, in altri termini, è uno strido molto alto. Similmente, ogni impulso del radar è uno «strido» di onde radio, con un'elevata frequenza portante. Il carattere speciale del radar a modulazione di frequenza è che non ha una frequenza portante fissa durante ogni strido, ma tale frequenza oscilla su o giù di un'ottava circa. Se si pensa a questi impulsi come a equivalenti di suoni, ogni emissione radar può essere concepita come l'urlo di un lupo. Il vantaggio del radar a modulazione di frequenza, in contrapposizione al radar a impulsi di altezza fisica, è il seguente: quando l'eco ritorna, non importa se la sorgente stia emettendo il suono, giacché il suono emesso e quello ricevuto non possono essere confusi fra loro. Ciò dipende dal fatto che l'eco ricevuta in ogni momento dato sarà un riflesso di una parte precedente del suono emesso, e avrà perciò un'altezza diversa.

I progettisti umani di radar hanno fatto buon uso di questa tecnica ingegnosa. C'è qualche prova del fatto che i pipistrelli abbiano «scoperto» anche questa tecnica, oltre al sistema di commutazione fra trasmissione e ricezione? In effetti numerose specie di pipistrelli producono grida la cui altezza va diminuendo, di solito di un'ottava circa, nel corso della loro emissione.

Queste grida, paragonabili all'ululato dei lupi, sono note come modulate in frequenza (fm). Pare che esse siano esattamente quel che si richiede per sfruttare la tecnica del radar chirp. Le prove finora raccolte suggeriscono però che i pipistrelli usino questa tecnica non per distinguere un'eco dal suono originale che l'ha prodotta, ma per il compito più sottile di distinguere degli echi da altri echi. Un pipistrello vive in un mondo di echi provenienti da oggetti vicini, da oggetti lontani e da oggetti a tutte le distanze intermedie. Esso deve distinguere questi echi l'uno dall'altro. Se emette grida di altezza calante, come gli ululati dei lupi, sarà in grado di distinguere con precisione fra i vari echi in base all'altezza. Quando un'eco proveniente da un oggetto lontano arriva infine di ritorno al pipistrello, sarà un'eco «più vecchia» di quella che gli arriva simultaneamente da un oggetto vicino. Essa avrà perciò un'altezza maggiore. Quando il pipistrello si trova di fronte a echi rimandati da vari oggetti, può applicare una semplice regola empirica: altezza maggiore significa maggiore distanza. La seconda idea brillante che potrebbe venire a un ingegnere, specialmente se è interessato a misurare la velocità di un bersaglio in movimento, è quella di sfruttare quello che i fisici chiamano l'effetto Doppler. Lo si potrebbe chiamare anche «effetto ambulanza» perché la sua manifestazione più familiare consiste nel calo improvviso in altezza del suono della sirena di un'ambulanza dopo il suo passaggio in prossimità dell'ascoltatore. L'effetto Doppler si verifica ogni volta che una sorgente di suono (o di luce o di qualsiasi altro tipo di onda) e un ricevitore di tale suono sono in movimento l'uno relativamente all'altro. È più facile pensare che la sorgente del suono sia immobile e l'ascoltatore in movimento. Supponiamo che la sirena sul tetto di una fabbrica emetta un suono

continuo, tutto della stessa altezza. Il suono viene emesso verso l'esterno sotto forma di una serie di onde. Queste non sono visibili, essendo onde di pressione nell'aria. Se potessero essere viste assomiglierebbero ai cerchi concentrici che si diffondono verso l'esterno quando gettiamo sassi nell'acqua tranquilla di uno stagno. Immaginiamo che una serie di sassi vengano lasciati cadere in rapida successione nel mezzo di uno stagno, così che dal suo centro si irraggino di continuo delle onde. Se ormeggiamo in qualche punto fisso dello stagno una nave giocattolo, questa oscillerà su e giù ritmicamente al passaggio delle onde sotto di essa. La frequenza con cui la nave oscilla è analoga all'altezza di un suono. Supponiamo ora che la nave, anziché essere all'attracco, sia in movimento attraverso lo stagno, e si diriga verso il centro da cui hanno origine i cerchi delle onde. Incontrando i successivi fronti d'onda, la nave continuerà a oscillare su e giù, ma la frequenza con cui incontra le onde è ora più elevata poiché essa è in movimento verso il luogo d'origine delle onde stesse. Essa oscillerà perciò su e giù con una frequenza maggiore. D'altra parte, una volta che abbia superato la sorgente delle onde e se ne stia allontanando diretta verso la riva opposta dello stagno, la frequenza con cui oscilla su e giù sotto l'effetto delle onde sarà ovviamente minore.

Per la stessa ragione, se passiamo a tutta velocità con un ciclomotore (preferibilmente non rumoroso) vicino a una fabbrica in cui sta suonando una sirena, mentre ci avviciniamo il suono della sirena risulterà più alto: le nostre orecchie stanno in effetti ricevendo le onde con una frequenza maggiore che se fossimo fermi. Per la stessa ragione, una volta che abbiamo superato la fabbrica e stiamo allontanandocene, l'altezza del suono calerà. Se ci fermiamo, sentiremo il tono della sirena com'è realmente, intermedio fra le due altezze determinate dall'effetto Doppler. Ne segue che, conoscendo esattamente l'altezza del suono della sirena, è teoricamente possibile calcolare con quanta velocità stiamo avvicinandoci alla sorgente del suono o ce ne stiamo allontanando: è sufficiente a tal fine ascoltare il tono apparente e confrontarlo con l'altezza «vera» del suono che conosciamo.

Vale lo stesso principio se a muoversi è la sorgente del suono mentre l'ascoltatore è immobile. Ecco perché questo effetto trova applicazione nel caso delle ambulanze. È poco plausibile il racconto che lo stesso Christian Doppler abbia dato una dimostrazione dell'effetto che porta il suo nome facendo passare a tutta velocità accanto a un pubblico affascinato un carro ferroviario aperto su cui suonava una banda di ottoni ingaggiata per l'occasione. Quel che importa è il movimento relativo, e per quanto concerne l'effetto Doppler non ha alcuna importanza se si consideri in movimento la sorgente del suono rispetto all'orecchio o l'orecchio rispetto alla sorgente del suono. Se due treni passano l'uno accanto all'altro in direzioni opposte, ciascuno viaggiando alla velocità di 200 chilometri all'ora, un passeggero su un treno sentirà il fischio dell'altro treno presentare un effetto Doppler molto marcato, giacché la velocità relativa è di 400 chilometri l'ora.

L'effetto Doppler è usato dai dispositivi radar della polizia per il controllo della velocità degli automobilisti. Uno strumento immobile invia segnali radar su una strada. Le onde radar vengono riflesse dalle automobili in avvicinamento e registrate dal ricevitore. Quanto maggiore è la velocità di una macchina, tanto maggiore è il mutamento Doppler della frequenza. Confrontando la frequenza emessa con la frequenza dell'eco di ritorno, la polizia, o piuttosto la sua apparecchiatura automatica, è in grado di calcolare la velocità di ogni autovettura. Se la polizia può usare questa tecnica per misurare la velocità degli automobilisti indisciplinati, non può darsi che i pipistrelli la usino per misurare la velocità degli insetti di cui si nutrono?

La risposta è: sì. È noto da molto tempo che i piccoli pipistrelli noti come «ferri di cavallo» emettono lunghe grida di altezza fissa piuttosto che brevi clic discontinui o urla discendenti come l'ululato dei lupi. Quando dico lunghe, intendo questa parola relativamente ai criteri consueti dei pipistrelli. Le «grida» durano infatti ancor meno di un decimo di secondo. E spesso alla fine di ciascun grido è unita, come vedremo, una sorta di ululato di tono discendente. Immaginiamo, dapprima, un pipistrello ferro di cavallo che, mentre si dirige in volo verso un oggetto immobile, come un albero, emetta un ronzio continuo di ultrasuoni. In conseguenza del movimento del pipistrello verso l'albero, i fronti d'onda colpiranno l'albero con una frequenza accelerata. Se sull'albero fosse collocato un microfono, esso «udrebbe» il suono, a causa del movimento del pipistrello, con uno spostamento del tono verso l'alto. Sull'albero non c'è alcun microfono, ma l'eco

riflessa dall'albero presenterà lo stesso spostamento del tono verso l'alto. Ora, mentre i fronti d'onda ritornano dall'albero verso il pipistrello in avvicinamento, questo sta ancora muovendosi rapidamente verso di essi. Perciò si ha un ulteriore mutamento Doppler nella percezione che il pipistrello ha dell'altezza dei suoni. Il movimento del pipistrello ha quindi come conseguenza una sorta di effetto Doppler raddoppiato, la cui grandezza è una precisa indicazione della velocità del pipistrello relativamente all'albero. Confrontando l'altezza del suo grido con quella dell'eco, il pipistrello (o piuttosto il computer incorporato nel suo cervello) potrebbe quindi, in teoria, calcolare la velocità con cui esso sta muovendosi verso l'albero. Ciò non direbbe al pipistrello a quale distanza si trovi dall'albero, ma potrebbe essere comunque un'informazione ancora molto utile. Se l'oggetto che riflette gli echi non fosse un albero immobile, bensì un insetto in movimento, le conseguenze dell'effetto Doppler sarebbero più complicate, ma il pipistrello potrebbe ancora calcolare la velocità del moto relativo fra se stesso e il suo bersaglio, che è chiaramente proprio il tipo di informazione di cui ha bisogno un pipistrello a caccia di insetti, esattamente come un perfezionatissimo missile teleguidato. In realtà alcuni pipistrelli mettono in atto un espediente che è più interessante della semplice emissione di grida di altezza costante e della misurazione dell'altezza degli echi di ritorno. Essi regolano con grande cura l'altezza delle grida emesse in modo da mantenere costante l'altezza dell'eco una volta che essa abbia subito il mutamento Doppler dell'altezza. Mentre il pipistrello si muove velocemente verso un insetto in volo, l'altezza delle sue grida muta costantemente, nella ricerca continua dell'altezza giusta per mantenere gli echi di ritorno a un'altezza fissa. Questo ingegnoso espediente mantiene l'eco all'altezza a cui le orecchie del pipistrello sono soprattutto sensibili, cosa importante dato che gli echi sono così deboli. Esso può quindi ottenere l'informazione necessaria per i suoi calcoli dell'effetto Doppler controllando l'altezza dei suoni che deve emettere per conseguire l'eco ad altezza fissa. Io non so se dispositivi costruiti dall'uomo, sonar o radar, usino questo sottile espediente. Ma se teniamo presente il principio che la maggior parte delle idee più ingegnose in questo campo sembrano essere state sviluppate dai pipistrelli prima che dall'uomo, non mi preoccuperei molto di sapere se la risposta sia o no positiva. È ragionevole attendersi che queste due tecniche piuttosto diverse, la tecnica del mutamento dell'altezza dei suoni utilizzando l'effetto Doppler e la tecnica del radar a modulazione di frequenza, siano utili a fini speciali diversi. Alcuni gruppi di pipistrelli si specializzano in una di queste due tecniche, altri nell'altra. Pare che alcuni gruppi tentino di ottenere il meglio da entrambe, attaccando un «ululato» in modulazione di frequenza alla fine (o a volte al principio) di un lungo «grido» di frequenza costante. Un altro espediente curioso usato dai pipistrelli ferri di cavallo concerne i movimenti della membrana del loro orecchio. A differenza di altri pipistrelli, i ferri di cavallo hanno la capacità di «battere» rapidamente avanti e indietro, a mo' di ali, il loro padiglione auricolare. È concepibile che questo ulteriore rapido movimento della superficie di ascolto rispetto al bersaglio causi utili modulazioni nell'altezza dei suoni ricevuti, modulazioni che forniscono un'informazione aggiuntiva. Quando il padiglione si muove in avanti, la velocità apparente del movimento verso il bersaglio ne risulta accresciuta.

Quando il movimento dell'orecchio è in direzione opposta al bersaglio, accade l'inverso. Il cervello del pipistrello «conosce» la direzione del «battito» di ciascun orecchio, e in linea di principio potrebbe eseguire i calcoli necessari per sfruttare l'informazione.

Il problema più difficile cui i pipistrelli devono far fronte è forse quello del disturbo dei propri segnali per opera delle grida di altri pipistrelli. Gli sperimentatori umani hanno trovato estremamente difficile ingannare i pipistrelli trasmettendo verso di essi ultrasuoni artificiali ad alta intensità. Ragionando a posteriori, lo si sarebbe potuto prevedere. I pipistrelli devono avere affrontato il problema di come evitare questo tipo di disturbo molto tempo fa. Molte specie di pipistrelli riposano in numero grandissimo in caverne che devono essere una babele assordante di ultrasuoni e di echi; eppure i pipistrelli riescono ancora a volare rapidamente all'interno della caverna, evitando le pareti e gli altri pipistrelli in volo nel buio più totale. In che modo un pipistrello tiene conto dei suoi echi ed evita di essere sviato dagli echi degli altri? La prima soluzione che potrebbe venire in mente a un ingegnere sarebbe quella di una qualche sorta di codificazione della frequenza: ogni pipistrello deve avere una propria frequenza privata, esattamente come le stazioni

radio distinte. In qualche misura è senza dubbio così, ma questo non è sicuramente tutto.

In che modo i pipistrelli evitino di essere disturbati dai segnali e dagli echi di altri pipistrelli non è del tutto certo, ma un indizio interessante è stato fornito dagli esperimenti con i quali si è tentato di ingannarli. È risultato che si possono imbrogliare efficacemente alcuni pipistrelli rimandandogli le loro grida con un ritardo artificiale. Se gli si trasmettono, in altri termini, falsi echi delle loro grida. È possibile persino, controllando con cura le apparecchiature che ritardano la falsa eco, indurre i pipistrelli a tentare di posarsi su sporgenze «fantasma». Io penso che questo fatto sia, per i pipistrelli, l'equivalente di guardare il mondo attraverso una lente.

Può darsi che i pipistrelli usino un espediente che potremmo chiamare un «filtro di stranezza». Ogni eco successiva delle grida del pipistrello produce un'immagine del mondo che ha senso in funzione della precedente immagine del mondo, costruita con echi anteriori. Se il cervello di un pipistrello ode un'eco del grido di un altro pipistrello e tenta di includerlo nell'immagine del mondo che si è costruita in precedenza, questa operazione non darà alcun senso. Sarebbe come se gli oggetti nel mondo fossero saltati improvvisamente a caso in varie direzioni. Gli oggetti del mondo reale non si comportano in un modo così folle, cosicché il cervello può escludere tranquillamente l'eco apparente come un semplice rumore di fondo privo di significato. Se uno sperimentatore umano fornisce a un pipistrello «echi» artificialmente ritardati o accelerati di proprie grida, i falsi echi avranno senso nei termini dell'immagine del mondo che il pipistrello si è costruito in precedenza. I falsi echi vengono accettati dal filtro di stranezza perché sono plausibili nel contesto degli echi precedenti. Essi fanno sembrare gli oggetti spostati solo di poco nella loro posizione, un comportamento che è conforme a quanto ci si può plausibilmente attendere dagli oggetti nel mondo reale. Il cervello del pipistrello si fonda sull'assunto che il mondo, quale viene presentato da un qualsiasi impulso riflesso, sarà o uguale a quello che è stato presentato da impulsi precedenti o solo di poco diverso: l'insetto che viene inseguito, per esempio, non può essersi spostato di molto.

C'è un articolo ben noto del filosofo Thomas Nagel intitolato Che effetto fa essere un pipistrello?

L'articolo non è tanto sui pipistrelli quanto sul problema filosofico di immaginare che cosa significhi essere qualcosa che non siamo. La ragione, però, per cui un pipistrello è un esempio particolarmente eloquente per un filosofo è che si presume che le esperienze di un animale che usa l'ecolocazione siano peculiarmente estranee e diverse rispetto alle nostre. Se volessimo farci un'idea dell'esperienza di un pipistrello, sarebbe quasi certamente un errore grossolano entrare in una caverna, gridare o battere assieme due cucchiaini, ritardare coscientemente il tempo in cui udremmo l'eco e calcolare in base a tale tempo quanto debba essere lontana la parete della caverna.

Quest'esperienza non ci direbbe che effetto faccia essere un pipistrello più di quanto il procedimento illustrato qui di seguito ci dia una buona idea di che cosa voglia dire vedere il colore: usiamo uno strumento per misurare la lunghezza d'onda della luce che entra nel nostro occhio: se la lunghezza d'onda è grande si vede il rosso, se è piccola si vede il violetto o il blu. È un fatto fisico che la luce che chiamiamo rossa ha una lunghezza d'onda maggiore della luce che chiamiamo blu. Le fotocellule sensibili al rosso e le fotocellule sensibili al blu nella nostra retina sono attivate da lunghezze d'onda diverse. Nella nostra sensazione soggettiva dei colori non c'è però alcuna traccia del concetto di lunghezza d'onda. Nulla in ciò «che vuol dire» vedere il blu o il rosso ci dice quale luce, se la rossa o la blu, abbia la lunghezza d'onda maggiore. Se la cosa è importante per noi (di solito non lo è), non abbiamo da far altro che ricordarla o (cosa che io faccio sempre) cercarla in un libro. Similmente, un pipistrello percepisce la posizione di un insetto usando quelli che noi chiamiamo echi. Ma il pipistrello non pensa sicuramente in termini di echi quando percepisce un insetto, non più di quanto noi pensiamo in termini di lunghezze d'onda quando percepiamo il blu o il rosso.

In effetti, se io fossi costretto a tentare l'impossibile, a immaginare che effetto faccia essere un pipistrello, farei la congettura che, per i pipistrelli, l'ecolocazione possa essere come la vista per noi. Noi siamo animali così radicalmente visivi che non riusciamo a renderci conto con facilità di quanto sia complicata la visione. Gli oggetti sono nell'ambiente esterno e noi pensiamo di «vederli» là fuori di noi. Io sospetto però che in realtà ciò che noi percepiamo sia un complesso modello computerizzato presente nel nostro cervello, costruito sulla base dell'informazione che ci viene

dall'esterno, ma trasformato nella nostra testa in una forma in cui tale informazione possa essere usata. Le differenze di lunghezza d'onda della luce esterna vengono codificate nel modello computerizzato nella testa come differenza di «colore». La figura e altri attributi sono codificati in modo simile, in una forma che sia facile da manipolare. La sensazione di vedere è, per noi, molto diversa dalla sensazione di udire, ma questa differenza non può essere dovuta direttamente alle differenze fisiche fra luce e suono. Tanto la luce quanto il suono sono, dopo tutto, tradotti dai rispettivi organi di senso nello stesso tipo di impulsi nervosi. È impossibile dire, sulla base degli attributi fisici di un impulso nervoso, se esso trasmetta informazioni sulla luce, sul suono o sugli odori. La ragione per cui la sensazione di vedere è così diversa dalla sensazione di udire e dalla sensazione di odorare consiste nel fatto che il cervello trova conveniente usare tipi diversi di modello interno del mondo visivo, del mondo uditivo e del mondo olfattivo. Le nostre sensazioni di vedere e di udire sono così diverse perché noi internamente usiamo la nostra informazione visiva e la nostra informazione uditiva in modi diversi e a fini diversi, e non direttamente a causa delle differenze fisiche fra luce e suono.

Ma un pipistrello usa la sua informazione uditiva per uno scopo molto simile a quello per cui noi usiamo la nostra informazione visiva. Esso usa il suono per percepire gli oggetti, e per aggiornare continuamente la posizione degli stessi nello spazio tridimensionale, esattamente nello stesso modo in cui noi usiamo la luce. Il tipo di modello computerizzato interno di cui ha bisogno è perciò un modello adatto alla rappresentazione interna delle posizioni mutevoli degli oggetti nello spazio tridimensionale. La mia tesi è che la forma che l'esperienza soggettiva di un animale assumerà sarà una proprietà del modello computerizzato interno. Quel modello sarà progettato, nell'evoluzione, in modo da poter fornire una rappresentazione interna utile, a prescindere dagli stimoli fisici che gli perverranno dall'esterno.

I pipistrelli e noi abbiamo bisogno dello stesso tipo di modello interno per rappresentare la posizione di oggetti nello spazio tridimensionale. Il fatto che i pipistrelli costruiscano il loro modello interno con l'aiuto di echi, mentre noi costruiamo il nostro con l'aiuto della luce, è irrilevante. L'informazione esterna viene tradotta, in ogni caso, nello stesso tipo di impulsi nervosi nel suo cammino verso il cervello.

Io congetturavo perciò che i pipistrelli «vedano» in modo molto simile a noi, nonostante la diversità del mezzo fisico con cui il mondo «esterno» viene tradotto in impulsi nervosi: ultrasuoni anziché luce. I pipistrelli potrebbero usare addirittura ai loro fini le sensazioni che noi chiamiamo colore per rappresentare differenze nel mondo esterno che potrebbero non avere nulla a che fare con la fisica della lunghezza d'onda, ma che potrebbero svolgere, per il pipistrello, un ruolo funzionale simile al ruolo che i colori svolgono per noi. I pipistrelli maschi potrebbero avere la superficie corporea caratterizzata da un pelo fine disposto in modo tale che i suoni che ne vengono riflessi fossero percepiti dalle femmine come vistosamente colorati, ossia con un suono equivalente alla livrea nuziale di un uccello del paradiso. Io non intendo quest'affermazione solo come una vaga metafora. Può darsi che la sensazione soggettiva sperimentata da un pipistrello femmina quando essa percepisce un maschio sia, diciamo, di un rosso brillante; la stessa sensazione che io provo quando vedo un fenicottero. O, almeno, la sensazione che la femmina del pipistrello ha del suo compagno potrebbe non differire dalla mia sensazione visiva di un fenicottero più di quanto questa differisca dalla sensazione visiva che di un fenicottero ha un altro fenicottero.

Donald Griffin ci racconta ciò che accadde quando egli e il suo collega Robert Galambos riferirono per la prima volta in un convegno di zoologi attoniti, nel 1940, la loro nuova scoperta dei vari aspetti della ecolocazione nei pipistrelli. Un eminente scienziato era così indignato nella sua incredulità che prese Galambos per le spalle e lo scosse, dicendo che non era possibile che noi intendessimo suggerire una cosa tanto assurda. Il radar e il sonar erano ancora sviluppi molto segreti della tecnologia militare e la nozione che i pipistrelli potessero fare qualcosa di anche lontanamente analogo ai trionfi più recenti dell'ingegneria elettronica colpiva molte persone come non solo non plausibile, ma addirittura ripugnante sul piano emotivo.

È facile simpatizzare con lo scetticismo del famoso scienziato. Nella sua riluttanza a credere c'è qualcosa di molto umano.

E questo è in effetti ciò che dice la sua riluttanza: è precisamente umano. Noi stentiamo a credere a ciò che fanno i pipistrelli proprio perché i nostri sensi umani non sono capaci di farlo.

Poiché noi riusciamo a capire tali prestazioni solo a un livello di strumentazione artificiale e di calcoli matematici su carta, troviamo difficile immaginare che un animaletto come il pipistrello possa risolvere tali problemi nella sua testa. Eppure i calcoli matematici che sarebbero necessari per spiegare i principi della visione sono altrettanto complessi e difficili, e nessuno ha mai avuto alcuna difficoltà a credere che degli animali di piccole dimensioni siano capaci di vedere. La ragione di questo doppio criterio nel nostro scetticismo è, del tutto semplicemente, che noi riusciamo a vedere mentre non possediamo la capacità della ecolocazione.

Io posso immaginarmi un qualche altro mondo in cui un gruppo di creature dotte, e totalmente cieche, simili a pipistrelli, riunite a convegno rimangano sbalordite nel sentirsi dire che l'animale detto uomo è capace di usare i nuovi raggi non udibili chiamati «luce», che sono ancora oggetto di sviluppi militari top secret, per orientarsi nell'ambiente. Questo essere, altrimenti di livello molto modesto, è quasi totalmente sordo (per la precisione, in un certo senso esso riesce a udire, ed è addirittura capace di emettere pochi borbottii ponderosamente lenti, molto strascicati, ma usa questi suoni solo per fini rudimentali, come comunicare con i suoi simili; non sembra invece capace di usarli per scoprire neppure gli oggetti di mole maggiore). L'uomo possiede invece organi altamente specializzati, chiamati «occhi», per sfruttare i raggi di «luce». Il Sole è la principale sorgente di raggi di luce e gli esseri umani riescono sorprendentemente a sfruttare gli echi complessi che rimbalzano sugli oggetti quando i raggi di luce emanati dal Sole li colpiscono. Essi hanno un ingegnoso dispositivo chiamato «lente cristallina» o, più semplicemente, «cristallino», la cui forma appare matematicamente calcolata in modo tale da deflettere questi raggi silenziosi in vista di una rappresentazione esatta dell'ambiente, di una corrispondenza biunivoca fra gli oggetti del mondo e un'«immagine» su uno strato di cellule detto «retina». Queste cellule retiniche sono capaci, in un qualche modo misterioso, di rendere la luce (in un certo senso) «udibile», dopo di che trasmettono le loro informazioni al cervello. I nostri matematici hanno dimostrato che è teoricamente possibile, eseguendo calcoli molto complessi, navigare con sicurezza nell'ambiente con l'ausilio di questi raggi di luce, con la stessa efficacia con cui lo si può fare normalmente usando ultrasuoni, e sotto qualche aspetto in modo addirittura più efficace! Ma chi avrebbe mai pensato che un umile essere umano fosse in grado di eseguire questi calcoli?

L'ecolocazione usata dai pipistrelli è solo uno delle migliaia di esempi che avrei potuto scegliere per illustrare l'argomento del progetto razionale. Gli animali danno l'impressione di essere stati progettati da un fisico o da un ingegnere molto dotato nella teoria e molto ingegnoso nella pratica, ma non c'è alcuna indicazione del fatto che i pipistrelli stessi conoscano o capiscano la teoria nello stesso senso in cui la capisce un fisico. Il pipistrello dev'essere concepito come qualcosa di analogo al dispositivo radar usato dalla polizia per cogliere in fallo gli automobilisti indisciplinati, e non alla persona che ha progettato tale dispositivo. Il progettista del misuratore della velocità usato dalla polizia comprendeva la teoria dell'effetto Doppler ed espresse questa comprensione in equazioni matematiche, scritte esplicitamente su carta. La comprensione del progettista è materializzata nel progetto dello strumento, ma lo strumento stesso non capisce il proprio funzionamento. Lo strumento contiene componenti elettronici, i quali sono collegati in modo tale da comparare automaticamente due frequenze radar e da convertire i risultati ottenuti in unità convenienti: chilometri all'ora. Il calcolo che si richiede è complesso, ma alla portata di una scatola di componenti elettronici moderni collegati fra loro nel modo appropriato. Ovviamente, è stato un cervello cosciente raffinato a eseguire i collegamenti (o almeno a progettare lo schema di cablaggio), ma nel funzionamento della scatola non ha parte alcun cervello cosciente.

La nostra esperienza della tecnologia elettronica ci prepara ad accettare l'idea che un meccanismo inconscio possa comportarsi come se comprendesse idee matematiche complesse. Quest'idea è trasferibile direttamente al funzionamento di un meccanismo vivente. Un pipistrello è una macchina la cui elettronica interna è cablata in modo tale che i suoi muscoli alari lo fanno dirigere verso un insetto, nello stesso modo in cui un missile guidato, privo di coscienza, punta verso un aereo in volo. Fin qui la nostra intuizione, derivata dalla tecnologia, è corretta. Ma la nostra esperienza della

tecnologia ci prepara anche a vedere, nella genesi di una macchina complessa, la mente di un progettista cosciente e intenzionale. È questa seconda intuizione che è sbagliata nel caso delle macchine viventi. In questo caso il «progettista» è la selezione naturale inconscia, l'orologiaio cieco.

Io spero che il lettore sia molto impressionato, come lo sono io e come lo sarebbe stato William Paley, da queste storie di pipistrelli. Il mio obiettivo è stato, sotto un certo aspetto, identico a quello di Paley. Io non vorrei che il lettore sottovalutasse le prodigiose opere della natura e i problemi che noi dobbiamo affrontare nello spiegarle. L'ecolocazione nei pipistrelli, pur essendo sconosciuta al tempo di Paley, sarebbe servita al suo fine altrettanto bene di uno qualsiasi dei suoi esempi. Paley ficcò bene in testa ai suoi lettori la sua argomentazione moltiplicando gli esempi. Egli esaminò l'intero corpo umano, dalla testa ai piedi, mostrando come ogni parte, ogni particolare anche minimo, fosse simile all'interno di un orologio ben costruito. Sotto molti aspetti io farei volentieri lo stesso, poiché ci sono storie meravigliose da raccontare e a me piace molto raccontare storie. In realtà, però, non c'è alcun bisogno di moltiplicare gli esempi. Uno o due basteranno. L'ipotesi che può spiegare la navigazione dei pipistrelli ben si presta a spiegare qualsiasi cosa nel mondo della vita, e se la spiegazione data da Paley per ciascuno dei suoi esempi era sbagliata non possiamo certo farla diventare giusta moltiplicando gli esempi stessi. La sua ipotesi era che gli orologi viventi fossero stati letteralmente progettati e costruiti da un maestro orologiaio. La nostra ipotesi moderna è che questo lavoro sia stato compiuto in fasi evolutive graduali dalla selezione naturale.

Oggi i teologi non sono così tutti d'un pezzo come Paley. Essi non sostengono che i meccanismi viventi complessi siano stati evidentemente progettati da un creatore, nello stesso senso in cui vengono progettati e costruiti gli orologi. C'è però una tendenza a dire che «è impossibile credere» che una tale complessità, o una tale perfezione, possa essersi evoluta per selezione naturale. Ogni volta che io leggo una tale osservazione, mi viene sempre il desiderio di scrivere in margine: «Parla per te». Gli esempi di questa tendenza abbondano (io ne ho contati 35 in un solo capitolo) nel volume *The Probability of God* del vescovo di Birmingham Hugh Montefiore. Nella parte restante di questo capitolo userò per tutti i miei esempi questo libro, dato che esso è un tentativo sincero e franco, compiuto da un autore rispettabile e colto, di aggiornare la teologia naturale.

Quando dico franco intendo franco. Diversamente da alcuni suoi colleghi teologi, il vescovo Montefiore non ha timore di dire che il problema dell'esistenza di Dio è una questione di fatto ben precisa. Egli non indulge in soluzioni evasive come: «Il cristianesimo è un modo di vita. Il problema dell'esistenza di Dio è eliminato: esso è un miraggio creato dalle illusioni del realismo». Alcune parti del suo libro sono sulla fisica e sulla cosmologia e io non ho alcuna competenza per commentarle, a parte l'osservazione che egli sembra avere usato come autorità dei fisici autentici. Magari avesse fatto lo stesso nelle parti biologiche! Purtroppo in queste ha preferito consultare le opere di Arthur Koestler, di Fred Hoyle, di Gordon Rattray-Taylor e di Karl Popper. Il vescovo crede nell'evoluzione, ma non può credere che la selezione naturale sia una spiegazione adeguata per il corso preso dall'evoluzione (in parte perché, come molti altri, egli fraintende purtroppo la selezione naturale, ritenendola «casuale» e «priva di significato»).

Montefiore fa un uso massiccio di quello che potrebbe essere chiamato l'argomento dell'incredulità personale. Nel corso di un capitolo troviamo le frasi seguenti, in questo preciso ordine: Pare non ci sia alcuna spiegazione su basi darwiniane [...] Non è facile da spiegare [...] È difficile da capire [...] Non è facile capire [...] È egualmente difficile spiegare [...] Non trovo facile comprendere [...] Non trovo facile vedere [...] Trovo difficile capire [...] Non pare possibile spiegare [...] Non riesco a vedere come [...]

Il neodarwinismo sembra incapace di spiegare molte fra le complessità del comportamento animale [...] Non è facile comprendere in che modo un tale comportamento potrebbe essersi evoluto esclusivamente attraverso la selezione naturale [...] È impossibile [...] Come potrebbe evolversi un organo così complesso? [...] Non è facile vedere [...] È difficile vedere [...]

L'argomento dell'incredulità personale è un argomento estremamente debole, come notò lo stesso Darwin. In alcuni casi esso si fonda semplicemente sull'ignoranza. Per esempio, uno dei fatti che il vescovo trova difficile capire è il colore bianco degli orsi polari.

Quanto al mimetismo, esso non è sempre facile da spiegare sulla base di premesse neodarwiniane. Se gli orsi polari sono dominanti nell'Artico, pare che non ci sarebbe stato per loro alcun bisogno di evolversi sviluppando una forma di mimetismo di colore bianco.

Quest'affermazione dovrebbe essere tradotta così: Io personalmente, standomene a disquisire seduto nel mio studio senza aver mai visitato l'Artico, non avendo mai visto un orso polare in libertà nel suo ambiente ed essendo stato educato in letterature classiche e in teologia, non sono riuscito finora a trovare una ragione per cui gli orsi polari potrebbero trarre beneficio dall'essere bianchi.

In questo caso specifico il vescovo Montefiore suppone che solo gli animali soggetti a un'attività di predazione da parte di altri animali abbiano bisogno di mimetizzarsi. Egli ignora il fatto che anche i predatori traggono beneficio dal fatto di restare invisibili alle loro prede. Gli orsi polari vanno a caccia di foche attaccandole di sorpresa mentre riposano sul ghiaccio. Se la foca vede l'orso avvicinarsi da una distanza sufficiente, può fuggire. Io sospetto che, se il vescovo Montefiore farà lo sforzo di immaginazione di figurarsi un orso grigio che si apposta sulla neve per attaccare furtivamente delle foche, vedrà immediatamente la risposta al suo problema.

L'argomento dell'orso polare è risultato quasi troppo facile da demolire ma, in un senso importante, non è questo il punto.

Persino se la massima autorità del mondo non riuscisse a trovare una spiegazione per un fenomeno biologico notevole, ciò non significherebbe che esso non possa essere spiegato. Numerosi misteri sono durati per secoli trovando però infine una spiegazione. Per quel che importa, la maggior parte dei biologi moderni non avrebbe alcuna difficoltà a spiegare ognuno dei 35 esempi del vescovo Montefiore nei termini della teoria della selezione naturale, anche se non tutti sono così semplici come quello degli orsi polari. Noi non stiamo però sottoponendo a un test l'ingegnosità umana nell'escogitare spiegazioni. Quand'anche trovassimo un esempio che non fossimo in grado di spiegare, dovremmo esitare prima di trarre conclusioni troppo radicali da questa nostra incapacità. Lo stesso Darwin fu molto chiaro su questo punto.

Esistono versioni più serie dell'argomento dell'incredulità personale, versioni che non si fondano semplicemente sull'ignoranza o sulla mancanza di ingegnosità. Una forma dell'argomentazione fa un uso diretto del senso estremo di meraviglia che noi tutti proviamo quando ci troviamo di fronte a meccanismi molto complessi, come la minuziosa perfezione del dispositivo di ecolocazione nei pipistrelli. L'implicazione è che una cosa così mirabile non può evidentemente essersi evoluta per selezione naturale. Il vescovo cita, con approvazione, ciò che G. Bennett scrive sulle ragnatele: E impossibile, per una persona che abbia osservato un ragno all'opera per molte ore, avere qualche dubbio sul fatto che né i ragni presenti della specie in oggetto né i loro progenitori furono mai gli architetti della ragnatela, e che la concezione di questa non può concepibilmente essersi prodotta passo passo per mezzo di variazioni casuali; sarebbe assurdo supporre che le proporzioni complesse ed esatte del Partenone siano state prodotte accumulando dei pezzi di marmo l'uno sull'altro.

Non è affatto impossibile. Questo è proprio ciò che io credo fermamente, e devo anche aggiungere che ho qualche esperienza di ragni e delle loro ragnatele.

Il vescovo Montefiore prosegue affrontando il tema dell'occhio umano e ponendosi retoricamente la domanda: «Come poté evolversi un organo così complesso?», con l'implicazione che non esiste risposta. Questo non è un argomento, ma semplicemente un'affermazione di incredulità. Alla base dell'incredulità intuitiva che noi tutti siamo tentati di provare dinanzi a quelli che Darwin definì organi di estrema perfezione e complicazione ci sono, secondo me, due ragioni. Innanzitutto, non abbiamo alcuna comprensione intuitiva delle immensità di tempo disponibili per il mutamento evolutivo. La maggior parte degli scettici sulla selezione naturale sono disposti ad accettare che questa possa determinare mutamenti minori, come la colorazione scura che si è evoluta in varie specie di falene dopo l'inizio della rivoluzione industriale. Ma, dopo avere accettato questo punto, essi insistono sull'esiguità di questo mutamento. Come sottolinea il vescovo Montefiore, la falena scura non è una nuova specie. Io sono d'accordo sulla tesi che questo sia un piccolo mutamento, e che non sia certo paragonabile all'evoluzione dell'occhio o dell'ecolocazione. Va però osservato che queste falene hanno impiegato solo un centinaio di anni per realizzare il loro mutamento. Un centinaio di anni sembra un tempo lungo per noi, essendo più lungo della durata della nostra vita,

ma per un geologo è un migliaio di volte circa più breve di quelli che è di solito in grado di misurare.

Gli occhi non si fossilizzano, cosicché non sappiamo quanto tempo il nostro tipo di occhio abbia impiegato a evolvere la sua presente complessità e a perfezionarsi dal nulla, ma il tempo disponibile è di varie centinaia di milioni di anni. Pensiamo, come termine di riferimento, ai mutamenti prodotti dall'uomo in un periodo di tempo molto più breve per mezzo della selezione genetica dei cani. In poche centinaia, o al massimo migliaia, di anni siamo passati dal lupo al pechinese, al bulldog, al chihuahua e al San Bernardo. Ah, ma tutte queste razze sono ancora cani, non è vero? Non si sono trasformate in una specie di animali diversa, no? Sì, se il lettore può trarre conforto dal giocare in questo modo con le parole, possiamo dire che essi sono ancora tutti cani.

Ma pensiamo solo alla durata di tempo nella quale si sono verificati tutti questi mutamenti.

Rappresentiamo con la lunghezza di un passo il tempo totale impiegato per l'evoluzione di tutte queste razze di cani da un lupo. Allora, sulla stessa scala, quanti passi si dovrebbero fare per risalire a Lucy e alla sua specie, i fossili umani più antichi dotati inequivocabilmente della locomozione eretta? La risposta è: circa tre chilometri. E quanta strada si dovrebbe fare per giungere sino all'inizio dell'evoluzione sulla Terra? La risposta è che ci si dovrebbe sobbarcare un viaggio decisamente faticoso, come quello da Londra a Baghdad. Si pensi all'entità del mutamento che si è realizzata nel passaggio dal lupo al chihuahua, e poi lo si moltiplichi per il numero dei passi che dividono Londra da Baghdad. In questo modo avremo una qualche idea intuitiva della quantità di mutamento che possiamo attenderci nell'evoluzione naturale reale.

La seconda ragione della nostra naturale incredulità dinanzi all'evoluzione di organi molto complessi come gli occhi dell'uomo e le orecchie del pipistrello è un'applicazione intuitiva della teoria della probabilità. Il vescovo Montefiore cita C.E.

Raven sui cuculi. Questi depongono le uova nel nido di altri uccelli, che operano poi come genitori adottivi involontari.

Come molti altri adattamenti biologici, quello del cuculo non è singolo bensì multiplo. Vari caratteri diversi rendono i cuculi ben adattati al loro modo di vita parassitico. Per esempio, la madre ha l'abitudine di deporre le uova nel nido di altri uccelli, e il piccolo ha l'abitudine di gettare fuori dal nido i piccoli dell'uccello che lo ospita. Entrambe queste abitudini aiutano il cuculo ad avere successo nella sua vita da parassita. Raven prosegue: Si vedrà che ciascuna condizione di questa sequenza è essenziale per il successo complessivo. Eppure ciascuna di esse è anche inutile isolatamente. L'intero opus perfectum dev'essere stato conseguito simultaneamente. Le probabilità contro l'occorrenza casuale di una tale serie di coincidenze sono, come abbiamo già detto, astronomiche.

Gli argomenti come questo sono, in linea di principio, più rispettabili dell'argomento fondato sulla mera incredulità. La misurazione dell'improbabilità statistica di un'evenienza è il modo giusto per valutarne la credibilità. Questo è, in effetti, un metodo che useremo varie volte in questo libro. Ma lo si deve usare nel modo giusto! Nell'argomentazione di Raven ci sono due cose sbagliate.

Innanzitutto c'è la confusione familiare e, come ho detto, piuttosto irritante, della selezione naturale col «caso».

Una mutazione è casuale; la selezione naturale è l'opposto stesso della casualità. In secondo luogo, non è assolutamente vero che «ciascuna di esse è anche inutile isolatamente». Non è vero che l'intera opera perfetta debba essere stata conseguita simultaneamente. Non è vero che ciascuna parte sia essenziale per il successo del tutto. Un semplice, rudimentale sistema di ecolocazione occhio/orecchio, o di parassitismo del cuculo ecc., è sempre meglio che niente. Senza occhi si è del tutto ciechi.

Avendo degli occhi molto imperfetti si è almeno in grado di rilevare la direzione generale del movimento di un predatore, anche se non si riesce a metterne a fuoco un'immagine chiara. E proprio in questo potrebbe risiedere l'intera differenza fra la vita e la morte. Questi argomenti saranno ripresi, con maggiore abbondanza di particolari, nei prossimi due capitoli.

III

L'accumulazione di piccoli mutamenti

Abbiamo visto che gli organismi viventi sono troppo improbabili e «progettati» con troppa eleganza per potere avere avuto origine dal caso. Come vennero dunque all'esistenza? La risposta - la risposta di Darwin - è: attraverso trasformazioni graduali, passo passo, a partire da inizi semplici, da entità primordiali abbastanza elementari da potere aver avuto origine per caso. Ogni mutamento successivo nel processo graduale dell'evoluzione fu abbastanza semplice, rispetto a quello immediatamente precedente, da potersi verificare per caso. L'intera sequenza dei passi cumulativi costituisce però qualcosa di molto diverso da un processo casuale, qualora si consideri la complessità del prodotto ultimo rispetto al punto di partenza originario.

Il processo cumulativo è diretto dalla sopravvivenza, un processo tutt'altro che casuale. In questo capitolo mi propongo di dimostrare l'efficacia di questa selezione cumulativa come processo fondamentale non casuale.

Se camminiamo avanti e indietro su una spiaggia ghiaiosa, noteremo che i ciottoli non sono disposti in modo casuale.

Quelli più piccoli tendono tipicamente a trovarsi in zone separate che corrono lungo la spiaggia, e quelli più grandi in altre zone o strisce a sé. I ciottoli sono stati scelti, sistemati, selezionati. Una tribù che visse in prossimità della spiaggia potrebbe meravigliarsi dinanzi a questa manifestazione di una scelta o disposizione ordinata nel mondo, e potrebbe sviluppare un mito per spiegarla, attribuendola per esempio a un Grande Spirito in cielo, con una mente precisa e uno spiccato senso dell'ordine.

Noi potremmo sorridere con aria di superiorità dinanzi a una nozione così superstiziosa, e spiegare che la disposizione ordinata dei ciottoli è stata opera in realtà delle forze cieche della fisica, in questo caso dell'azione delle onde. Le onde non hanno alcun fine e nessuna intenzione, né una mente ordinata, e neppure una mente in generale. Esse si limitano a spostare con energia i ciottoli, e si dà il caso che ciottoli grandi e ciottoli piccoli rispondano in modo diverso a questo trattamento, cosicché finiscono con l'essere trasportati a livelli diversi della spiaggia.

Una piccola quantità d'ordine ha avuto origine dal disordine, senza essere pianificata da nessuna mente.

Le onde e i ciottoli costituiscono congiuntamente un esempio semplice di un sistema che genera automaticamente la non casualità. Il mondo è pieno di sistemi del genere. L'esempio più semplice che io possa concepire in proposito è quello di un buco. Solo oggetti più piccoli del buco possono passare attraverso di esso. Ciò significa che se, in principio, abbiamo al di sopra del buco una collezione di oggetti casuali e se qualche forza li scuote e li spinge a caso, dopo un po' di tempo gli oggetti al di sopra e quelli al di sotto del buco cominceranno a essere assortiti in modo non casuale. Lo spazio al di sotto del buco tenderà a contenere oggetti più piccoli del buco stesso e lo spazio al di sopra tenderà a contenere oggetti più grossi del buco. L'umanità ha sfruttato ovviamente questo semplice principio per generare la non casualità nel semplice dispositivo noto come setaccio o crivello.

Il sistema solare è una disposizione stabile di pianeti, comete e detriti orbitanti attorno al Sole, ed è presumibilmente uno dei molti sistemi gravitanti simili nell'universo. Quanto più un pianeta è vicino al suo sole, tanto più rapidamente deve viaggiare per controbilanciare la gravità dell'astro centrale e rimanere nella sua orbita stabile. Per qualsiasi orbita data c'è una sola velocità alla quale il pianeta può muoversi continuando a restare nella sua orbita. Se esso si muovesse a qualsiasi altra velocità, o evaderebbe nello spazio o sarebbe inghiottito dal suo sole, o passerebbe in un'altra orbita. E se noi consideriamo i pianeti del nostro sistema solare, troviamo - guarda, guarda! - che ognuno di essi sta viaggiando esattamente alla velocità giusta per mantenersi nella sua orbita stabile attorno al Sole. È forse, questo, un miracolo di razionalità previdente? No, è solo un altro «crivello»

naturale. È chiaro che tutti i pianeti che vediamo orbitare attorno al Sole devono muoversi esattamente alla giusta velocità per poter restare nelle loro orbite, altrimenti non li vedremmo perché non sarebbero lì! Ma altrettanto ovvio è che questa non è una prova di un disegno intenzionale. È solo un'altra sorta di crivello.

Una cernita di quest'ordine di semplicità non è di per sé sufficiente a rendere ragione delle grandi quantità di ordine non casuale che vediamo negli organismi viventi. Tutt'altro. Ricordiamo l'analogia del lucchetto a combinazione. Il tipo di non casualità generabile per mezzo di un semplice crivello è grosso modo equivalente ad aprire un lucchetto a combinazione con un solo disco combinatore: non è difficile aprire un lucchetto del genere affidandosi alla sola fortuna. Il tipo di non casualità che osserviamo nei sistemi viventi equivale invece a un gigantesco lucchetto a combinazione con un numero di dischi combinatori quasi incalcolabile. Generare una molecola biologica come l'emoglobina - il pigmento rosso del sangue - per mezzo del semplice metodo del crivello equivarrebbe a prendere tutti gli amminoacidi che compongono l'emoglobina, mescolarli assieme a caso e sperare che la molecola di emoglobina si ricostituisca per mera fortuna. La fortuna che si richiederebbe per ottenere questo risultato è inimmaginabile ed è stata usata come esempio di una cosa che confonde la mente da Isaac Asimov e da altri.

Una molecola di emoglobina è formata da quattro catene di amminoacidi attorte assieme. Consideriamo una sola di queste catene. Essa è costituita da 146 amminoacidi. Ci sono venti tipi diversi di amminoacidi, che si trovano di solito negli organismi viventi. Il numero dei modi possibili di disporre 20 tipi di cose in catene con 146 anelli è un numero inconcepibilmente grande, che Asimov chiama il «numero dell'emoglobina». È un numero facile da calcolare ma impossibile da visualizzare. Il primo anello nella catena di 146 anelli può essere uno dei 20 possibili amminoacidi. Anche il secondo anello può essere uno dei 20 amminoacidi, cosicché il numero delle possibili catene di due anelli è 20×20 , ossia 400. Il numero delle possibili catene di tre anelli è di $20 \times 20 \times 20$, ossia 8000. Il numero delle possibili catene di 146 anelli è 20 moltiplicato per se stesso 146 volte. È un numero sbalorditivamente grande.

Un milione, come tutti sanno, è un uno seguito da sei zeri. Un miliardo è un uno seguito da nove zeri. Il numero che stiamo cercando, il «numero dell'emoglobina», è (press'a poco) un 1 seguito da 190 zeri! La probabilità di poter imboccare per caso l'emoglobina è dunque pari a 1 a 20 alla 190esima. E una molecola di emoglobina ha solo una piccolissima frazione della complessità di un corpo vivente. Il semplice metodo del crivello, da solo, è dunque chiaramente lontanissimo dalla capacità di generare la quantità di ordine che esiste in un organismo vivente.

Questo metodo è sì un ingrediente essenziale nella generazione dell'ordine vivente, ma è molto lontano dall'essere l'intera storia. Occorre anche qualcos'altro. Per spiegare questo punto, dovrò fare una distinzione fra selezione «a passi singoli» e selezione «cumulativa». I crivelli semplici che abbiamo considerato finora in questo capitolo sono altrettanti esempi della selezione a passi singoli. L'organizzazione vivente è il prodotto della selezione cumulativa.

La differenza essenziale fra la selezione a passi singoli e la selezione cumulativa è la seguente. Nella selezione a passi singoli le entità selezionate, siano esse ciottoli o qualsiasi altra cosa, sono selezionate una volta per tutte. Nella selezione cumulativa, invece, esse «si riproducono», o in qualche altro modo i risultati di un processo di cernita vengono sottoposti a un ulteriore processo di cernita e i risultati di questo processo vengono a loro volta sottoposti a una nuova cernita..., e via dicendo. Queste entità vengono sottoposte a selezione col metodo del crivello per molte «generazioni» consecutive. Il prodotto finale di una generazione di selezione è il punto di partenza per la successiva generazione di selezione, e così via per molte generazioni. È naturale usare parole come «riprodurre» e «generazione», che hanno associazioni con organismi viventi, poiché gli organismi viventi sono gli esempi principali che noi conosciamo di cose che presentano una selezione cumulativa. Essi potrebbero essere in pratica le uniche cose soggette a una tale sorta di selezione. Per il momento, però, non voglio dare questo fatto per scontato asserendolo in modo così perentorio.

A volte le nubi, attraverso il rimescolamento casuale per opera dei venti, vengono ad assomigliare a oggetti familiari.

Esistono molte fotografie pubblicate, scattate dal pilota di un piccolo aereo, di una nube che assomiglia alla faccia di Gesù, che ci fissa dal cielo. Noi tutti abbiamo visto qualche volta nubi che ci ricordavano qualcosa: un cavalluccio marino o una faccia sorridente. Queste somiglianze sono il frutto della selezione a passi singoli, in altri termini sono prodotte da una singola coincidenza. Di conseguenza non sono molto impressionanti. La somiglianza delle costellazioni dello zodiaco con gli animali da cui prendono il nome - Scorpione, Leone, Ariete e via dicendo - è così poco significativa come le predizioni degli astrologi. Noi non ci sentiamo profondamente colpiti da quella somiglianza così come lo siamo dagli adattamenti biologici, che sono i prodotti della selezione cumulativa. Noi descriviamo come misteriosa, prodigiosa o spettacolare la somiglianza, per esempio, di un insetto fogliasecca (*Phyllium*) a una foglia o di una mantide religiosa a un gruppo di fiori rosa. La somiglianza di una nube a una donnola è solo un po' divertente, e merita al più di richiamare su di essa l'attenzione del proprio compagno di passeggiata. Inoltre, è abbastanza probabile che noi cambiamo presto parere circa l'oggetto a cui la nuvola assomiglia di più.

Hamlet: "Do you see yonder cloud that's almost in shape of a camel?"

Polonius: "By th' mass, and 'tis like a camel indeed."

Hamlet: Methinks it is like a weasel.

Polonius: "It is backed like a weasel."

Hamlet: "Or like a whale?"

Polonius: "Very like a whale."

Amleto: "Vedete laggiù quella nuvola che sembra un cammello?"

Polonio: "Sacripante! È un cammello davvero!"

Amleto: "O forse somiglia a una donnola."

Polonio: "Infatti, ha la forma di donnola."

Amleto: "Non pare una balena?"

Polonio: "Tale e quale, una balena". 1

1 W. Shakespeare, *Amleto*, trad. di E. Montale, Mondadori, Milano 1997, atto III, scena II, p. 171.

Io non so chi sia stato il primo a dire che, dato un tempo abbastanza lungo, una scimmia che battesse a caso sui tasti di una macchina per scrivere potrebbe produrre tutte le opere di Shakespeare. La frase cruciale è, ovviamente, «dato un tempo abbastanza lungo». Supponiamo che la scimmia debba produrre non le opere complete di Shakespeare bensì solo la breve frase «Methinks it is like a weasel» («O forse somiglia a una donnola»), e noi le faciliteremo il compito dandole una macchina per scrivere con una tastiera ridotta, con le sole 26 lettere (maiuscole) e la barra per gli spazi. Quanto tempo impiegherà la nostra scimmia dattilografa a scrivere quest'unica piccola frase?

La frase comprende 28 caratteri, cosicché supporremo che la scimmia compia una serie di «tentativi» discreti di 28 battute.

Se la scimmia scriverà la frase correttamente, l'esperimento sarà concluso. In caso contrario le permetteremo un altro «tentativo» di 28 battute. Io non conosco scimmie, ma per fortuna mia figlia, che ha undici mesi, è un dispositivo randomizzante sperimentato e ha accettato con un entusiasmo persino eccessivo di assumersi il ruolo di scimmia dattilografa. Ecco che cosa essa ha battuto sul computer: ummk jk cdzz f zd dsdsksm s ss fmcv pu i ddrglkdxrrdo rdte qdwfdvioy udszkzwdccvyt h chvy nmgnbaytdfccvd d redfyym n dfskd ld k wdwk jjkauizmzi uxdkidisfumdkudxi Mia figlia non dispone però di tutto il suo tempo, cosicché fui costretto a programmare il computer per simulare un bambino piccolo o una scimmia che battessero a caso sulla tastiera: wldmnltdtjbkwirzrezlmqco p y yvmqkzpgjxwvhglawfvchqyopy mwr swtnuxmledleubxtqhnzyjqf fu ovaodvykdgxdeyvmoggs vt hzqzdsfzihivphzpektpwovpmzgf gewrgzrbctpgqmckhfdbgw zccf eccetera, eccetera. Non è difficile calcolare quanto tempo dovremmo ragionevolmente attendere

perché il computer randomizzato (o il bambino piccolo o la scimmia) batta la frase «Methinks it is like a weasel». Si pensi al numero totale di frasi possibili della lunghezza giusta che la scimmia o il bambino piccolo o il computer randomizzato potrebbero battere. È lo stesso tipo di calcolo che abbiamo fatto per l'emoglobina, e produce un risultato similmente grande. Nella prima posizione ci sono 27 lettere possibili (contando come una lettera anche lo «spazio»). La probabilità che la scimmia imbrotchi subito la prima lettera - m - è perciò di 1 a 27. La probabilità di indovinare le prime due lettere - me - è uguale alla probabilità di ottenere la seconda lettera - la e - giusta, dato che sia già stata imbrotcata la prima lettera - la m -; abbiamo perciò $(1/27) \times (1/27)$, che è uguale a $1/729$. La probabilità di azzeccare la prima parola - methinks è di $1/27$ per ciascuna delle 8 lettere, e quindi $(1/27) \times (1/27) \times (1/27) \times (1/27) \dots$ ecc. sette volte, ossia $(1/27)$ elevato all'ottava potenza. La probabilità di ottenere in questo modo l'intera frase di 28 caratteri è di $(1/27)^{28}$, ossia $(1/27)$ moltiplicato 27 volte per se stesso. Questa probabilità è molto piccola, circa 1 su 10.000 milioni di milioni di milioni di milioni di milioni di milioni. Per esprimerci in termini moderati, ci vorrebbe molto tempo per ottenere la frase che cerchiamo, per non parlare di battere a macchina le opere complete di Shakespeare.

Quanto ho detto vale però per la selezione di variazioni casuali a passi singoli. Ma che dire della selezione cumulativa?

Quanto più efficace dovrebbe essere questo tipo di selezione?

La risposta è: molto, molto più efficace, forse più di quanto possiamo renderci conto a prima vista, anche se, a rifletterci sopra un po' di più, si vede che è una cosa quasi ovvia. Usiamo di nuovo la nostra scimmia computerizzata, ma con una differenza determinante nel suo programma. La scimmia comincia di nuovo scegliendo una sequenza casuale di 28 lettere, esattamente come nel primo esperimento: wdlmnl dtjbkwirzreqlmqco p Ora però essa «si riproduce a partire da» questa frase casuale.

Essa duplica la frase ripetutamente, ma con una certa probabilità di errore casuale - «mutazione» - nella copiatura. Il computer esamina le frasi mutanti nonsense, la «progenie» della frase originaria, e sceglie quella che, per quanto poco, assomiglia di più alla frase bersaglio, «Methinks it is like a weasel». In questo caso la frase vincente della «generazione» successiva risulta essere: wdltnl dtjbswirzreqlmqco p Non si può certo dire che ci sia un miglioramento molto chiaro! Ma si ripete il procedimento, dalla frase «nasce» un'altra «progenie» mutante e viene scelto un nuovo «vincitore». Questo procedimento continua una generazione dopo l'altra. Dopo dieci generazioni la frase scelta per essere «riprodotta» è: mdlmnl itjswhrzre mecs p Dopo venti generazioni: mldlnl it iswrke z weasel A questo punto l'occhio della fede si convince di poter vedere una somiglianza con la frase bersaglio. Dopo trenta generazioni non è più lecito alcun dubbio: methinks it iswlike b weasel La generazione 40 ci porta a una lettera dal bersaglio: methinks it is like i weasel E il bersaglio viene finalmente raggiunto nella generazione 43. Un secondo esperimento ebbe inizio con la frase: y yvmqkzpfjxwvhglawfvchqxyopy Da questa si passò poi (riferendo di nuovo solo i risultati ottenuti ogni dieci generazioni) a: y yvmqkspftxwshlikefv hqyspy yethinkspitxishlikefa wqyse methinks it isslike a wefsey methinks it isblike a weases methinks it isjlike a weaseo methinks it is like a weasep e la frase bersaglio fu infine raggiunta alla generazione 64. In un terzo tentativo fu sottoposta al computer la frase di partenza gewrgzrbctpgqmckhfdgbw zccf, e l'obiettivo «Methinks it is like a weasel» fu raggiunto in 41 generazioni di «riproduzione» selettiva. Il tempo esatto impiegato dal computer per raggiungere il bersaglio non ha alcuna importanza. Se il lettore vuol proprio saperlo, esso completò l'intero esercizio per me, la prima volta, mentre io ero fuori a colazione. Impiegò una mezz'ora circa. (I fanatici dei computer potrebbero pensare che questo tempo sia eccessivamente lungo. La ragione di ciò consiste nel fatto che avevo scritto il programma in basic, una sorta di linguaggio per neonati. Quando lo riscrissi in pascal, il computer impiegò 11 secondi.) I computer sono un po' più veloci delle scimmie a compiere questo tipo di lavoro, ma in realtà la differenza non è significativa. Quel che importa è la differenza fra il tempo impiegato dalla selezione cumulativa e il tempo che lo stesso computer, lavorando allo stesso ritmo, impiegherebbe a raggiungere la frase bersaglio se fosse costretto a usare l'altro procedimento, quello della selezione a passi singoli: circa un milione di milioni di milioni di milioni di milioni di

anni. Questo è più di un milione di milioni di milioni di volte più lungo del tempo passato dall'origine dell'universo a oggi. In realtà sarebbe più giusto dire che, rispetto al tempo che impiegherebbero a scrivere la nostra frase una scimmia o un computer programmato a scrivere lettere a caso, l'età totale dell'universo dalla sua origine a oggi è una quantità trascurabilmente piccola, così piccola da essere ben all'interno del margine di errore per questa sorta di calcolo scarabocchiato su una busta, mentre il tempo impiegato a compiere lo stesso lavoro da un computer che lavorasse bensì a caso, ma col vincolo della selezione cumulativa, è dello stesso ordine che gli esseri umani sono normalmente in grado di capire, fra 11 secondi e il tempo che si impiega a fare lo spuntino di mezzogiorno.

C'è, quindi, una grande differenza fra la selezione cumulativa (in cui ogni miglioramento, per quanto piccolo, viene usato come base per la costruzione futura) e la selezione a passi singoli (in cui ogni nuovo «tentativo» è una nuova partenza). Se il progresso evolutivo dovesse fare affidamento sulla selezione a passi singoli, non sarebbe mai arrivato da nessuna parte. Se, invece, ci fosse un modo in cui le condizioni necessarie per la selezione cumulativa potessero venire stabilite dalle forze cieche della natura, si potrebbero avere conseguenze strane e mirabili. Di fatto, questo è esattamente quanto accadde su questo pianeta, e noi stessi siamo fra le conseguenze più recenti, se non le più strane e più mirabili, di questi sviluppi.

È sorprendente che calcoli come quello dell'emoglobina vengano usati di tanto in tanto come se costituissero degli argomenti contro la teoria di Darwin. Le persone che adducono argomenti di questo genere, pur essendo spesso esperte nel loro proprio campo, l'astronomia o qualsiasi altra scienza, sembrano credere sinceramente che il darwinismo spieghi l'organizzazione vivente in funzione del solo caso (o della sola probabilità): la sola «selezione a passi singoli». Questa convinzione, che l'evoluzione darwiniana sia «casuale», non è semplicemente falsa, ma è l'esatto opposto della verità. Nella ricetta di Darwin la probabilità è solo un ingrediente secondario: l'ingrediente più importante è la selezione cumulativa, che è essenzialmente non casuale.

Le nuvole non sono capaci di accedere alla selezione cumulativa. Non esiste alcun meccanismo in virtù del quale nubi di forme particolari possano generare nuvole figlie simili a se stesse.

Se esistesse un tale meccanismo, se una nuvola simile a una donnola o a un cammello potesse dare origine a una stirpe di altre nuvole pressa poco della stessa forma, la selezione cumulativa avrebbe l'opportunità di operare. Ovviamente, a volte accade che le nuvole si rompano e formino nuvole «figlie», ma ciò non basta perché si possa avere una selezione cumulativa. A questo scopo è infatti necessario che la «progenie» di qualsiasi nuvola data assomigli alla sua «genitrice» più di quanto assomigli a ogni vecchia nuvola nella «popolazione». Questo punto, di importanza vitale, viene a quanto pare frainteso da alcuni dei filosofi che, in anni recenti, hanno concepito interesse per la teoria della selezione naturale. Per aversi una selezione cumulativa fra le nuvole sarebbe inoltre necessario che le probabilità, per una data nuvola, di sopravvivere e generare copie di se stessa dipendessero dalla sua forma. Forse, in qualche lontana galassia, queste condizioni potrebbero essersi verificate, dando origine, se è trascorso un numero sufficiente di milioni di anni, a qualche forma di vita eterea, impalpabile. Questa potrebbe essere forse una buona idea per un romanzo di fantascienza - che potrebbe chiamarsi *La nuvola bianca* -, ma ai nostri fini è più facile da comprendere un modello per computer come quello della scimmia che rifà Shakespeare.

Benché il modello della scimmia che riscrive tutto Shakespeare battendo a caso sulla tastiera sia utile per spiegare la distinzione fra la selezione a singoli passi e la selezione cumulativa, esso è svante sotto taluni aspetti importanti. Uno di questi è che, in ogni generazione di «riproduzione» controllata selettiva, le frasi della «progenie» mutante furono giudicate secondo il criterio della somiglianza a un lontano bersaglio ideale, la frase «*Methinks it is like a weasel*». La vita è però diversa da questo esempio. L'evoluzione non ha un obiettivo a lungo termine. Non c'è un bersaglio lontano, nessuna perfezione finale funge da criterio per la selezione, anche se la vanità umana accarezza la nozione assurda che obiettivo finale dell'evoluzione sia la nostra specie. Nella vita reale il criterio della selezione è sempre a breve termine: o la semplice sopravvivenza o, più in generale, il successo riproduttivo. Se, dopo miliardi di anni, giudicando col senno di poi, pare che sia stato conseguito quello che sembra un progresso verso un qualche obiettivo lontano, questa è

sempre una conseguenza incidentale di molte generazioni di selezione a breve termine. Quell'«orologio» che è la selezione naturale cumulativa è cieco al futuro e non ha alcun obiettivo a lungo termine.

Per tener conto di questo punto, noi possiamo apportare delle modifiche al nostro modello computerizzato. Possiamo inoltre renderlo più realistico sotto altri aspetti. Poiché lettere e parole sono manifestazioni peculiarmente umane, programiamo invece il computer a disegnare delle figure. Potremmo addirittura vedere evolversi nel computer figure simili ad animali, per mezzo della selezione cumulativa di forme mutanti. Non eserciteremo alcuna influenza sul lavoro del computer dandogli figure di animali specifiche da cui prendere l'avvio. Vogliamo infatti che le nostre figure emergano esclusivamente come risultato di una selezione cumulativa di mutazioni casuali.

Nella realtà la forma di ciascun singolo animale viene prodotta per mezzo dello sviluppo dell'embrione. L'evoluzione si verifica a causa delle lievi differenze che, in generazioni successive, si presentano nello sviluppo embrionale. Queste differenze sono la conseguenza di cambiamenti («mutazioni»: è questo il piccolo elemento casuale nel processo di cui sto parlando) nei geni che controllano lo sviluppo. Nel nostro modello elaborato al computer, perciò, noi dobbiamo avere qualcosa di equivalente allo sviluppo embrionale, e qualcosa di equivalente ai geni che possono mutare. Ci sono molti modi in cui soddisfare queste specificazioni in un modello computerizzato. Io ne ho scelto uno e ho scritto un programma apposito che lo include. Passerò ora a descrivere questo modello poiché penso che sia rivelatore.

Il lettore che non sapesse nulla sui computer dovrebbe solo ricordare che essi sono macchine che fanno esattamente ciò che si dice loro di fare, ma che spesso danno risultati che ci sorprendono. Un elenco di istruzioni per un computer si chiama programma.

Lo sviluppo embrionale è un processo troppo elaborato per poter essere simulato realisticamente su un piccolo computer.

Siamo perciò costretti a rappresentarlo con un analogo semplificato. Dobbiamo trovare una regola semplice, e che possa essere fatta variare sotto l'influenza di «geni». Quale regola di disegno dobbiamo scegliere? I testi di informatica illustrano spesso l'efficacia di quella che chiamano programmazione «ricorsiva» con un semplice procedimento di crescita ad albero. Il computer comincia disegnando una singola linea verticale. Poi la linea si ramifica in due. Successivamente ognuno dei rami si scompone a sua volta in due sotto-rami, e ogni sotto-ramo in sotto-rami, e via dicendo. Il procedimento è «ricorsivo» perché la stessa regola (in questo caso quella della ramificazione) viene applicata localmente all'intero albero in crescita. Per quanto grande possa diventare l'albero, la medesima regola della ramificazione continua a essere applicata alla punta di tutti i suoi rami.

La «profondità» della ricorrenza significa il numero dei sotto-sotto... rami di cui si consente la crescita prima di arrestare il processo. La figura 2 ci mostra che cosa accade quando si dice al computer di obbedire esattamente alla stessa regola di disegno, ma lasciando procedere la ricorrenza a varie profondità.

Ad alti livelli di ricorrenza il disegno diventa molto elaborato, ma nella figura 2 si può vedere facilmente che esso è ancora prodotto dalla stessa semplicissima regola di ramificazione.

Questo è, ovviamente, proprio ciò che accade in un albero reale.

Lo schema di ramificazione di una quercia o di un melo sembra complesso, ma in realtà non lo è.

La regola fondamentale di ramificazione è semplicissima. L'intero albero finisce con l'essere grande e frondoso solo perché la regola viene applicata ricorsivamente alle punte in crescita di tutto l'albero: i rami formano sotto-rami, poi ogni sotto-ramo forma sotto-sotto-rami e via dicendo.

La ramificazione ricorsiva è anche una buona metafora per lo sviluppo embrionale di piante e animali in generale. Non voglio dire con questo che gli embrioni animali abbiano un aspetto simile a quello di alberi che si ramificano. Tutti gli embrioni crescono però per divisione cellulare. Ogni cellula si divide sempre in due cellule figlie. Inoltre i geni esercitano sempre i loro effetti sui corpi per mezzo di influenze locali sulle cellule e sullo schema di ramificazione della divisione cellulare. I geni di un animale non sono mai un progetto grandioso, un piano per il corpo intero. Essi, come

vedremo, sono più simili a una ricetta che a un progetto, e per giunta una ricetta che viene messa in pratica non dall'embrione in sviluppo nella sua totalità bensì da ciascuna cellula di ciascuna aggregazione locale di cellule in divisione. Io non nego che l'embrione, e più tardi l'adulto, abbiano una forma su grande scala, ma questa emerge in conseguenza di una quantità di piccoli effetti cellulari locali in tutto il corpo in sviluppo, i quali effetti locali consistono primariamente in ramificazioni in due direzioni, nella forma di divisioni cellulari. È attraverso l'influenza esercitata su questi eventi locali che i geni esercitano in definitiva le loro influenze sul corpo adulto.

La semplice regola di ramificazione per il disegno di alberi ci appare quindi un analogo promettente per lo sviluppo embrionale. Noi la includiamo perciò in una piccola procedura per computer, la chiamiamo sviluppo e ci prepariamo a inserirla in un programma maggiore che chiamiamo evoluzione. Come primo passo nello scrivere questo programma più vasto, rivolgiamo ora la nostra attenzione ai geni. Come dobbiamo rappresentare i «geni» nel nostro modello? I geni nella vita reale fanno due cose. Essi influiscono sullo sviluppo e vengono trasmessi a future generazioni. In animali e piante reali ci sono decine di migliaia di geni, ma noi limiteremo più modestamente il nostro modello a nove geni. Ognuno di questi è rappresentato nel computer semplicemente da un numero, che chiameremo il suo valore. Il valore di un gene particolare potrebbe essere, per esempio, 4 o -7.

Come possiamo far sì che questi geni influiscano sullo sviluppo? Ci sono quantità di cose che essi potrebbero fare. L'idea fondamentale è che dovrebbero esercitare una qualche influenza quantitativa minore sulla regola di disegno che chiamiamo sviluppo. Per esempio, un gene potrebbe influire sull'angolo di ramificazione, mentre un altro potrebbe influire sulla lunghezza di un qualche ramo particolare. Un'altra cosa ovvia per un gene è quella di influire sulla profondità della ricorrenza, il numero delle successive ramificazioni. Io ho assegnato questo effetto al gene 9. Possiamo considerare perciò la figura 2 come un'immagine di sette organismi affini, identici fra loro tranne che nel gene 9. Non specificherò nei particolari che cosa faccia ciascuno degli altri otto geni. Possiamo farci un'idea generale dei tipi di cose che essi fanno studiando la figura 3. Al centro della figura c'è l'albero base, uno di quelli della figura 2. Tutto attorno a quest'albero centrale ci sono altri otto alberi. Essi sono tutti uguali all'albero centrale con l'unica differenza che un gene - un gene diverso in ciascun caso - ha subito una «mutazione». Per esempio, l'immagine a destra dell'albero centrale mostra che cosa accade quando il gene 5 muta per mezzo dell'aggiunta di +1 al suo valore. Se ci fosse stato spazio a sufficienza, mi sarebbe piaciuto stampare attorno all'albero centrale una corona di 18 mutanti. La ragione della scelta del numero 18 consiste nel fatto che ci sono nove geni, e che ciascuno di essi può mutare in una direzione «verso l'alto» (aggiunta di uno al suo valore) o «verso il basso» (sottrazione di uno al suo valore).

Una corona di 18 alberi sarebbe stata quindi sufficiente a rappresentare tutti i possibili mutanti di un singolo passo derivabili dall'albero centrale.

Ognuno di questi alberi ha la sua propria «formula genetica» unica, formata dai valori numerici dei suoi nove geni. Non riporto qui le formule genetiche perché non avrebbero di per sé alcun significato per il lettore. Questo vale anche per i geni reali. Essi cominciano a significare qualcosa solo una volta che, attraverso la sintesi delle proteine, siano stati tradotti in regole di accrescimento per un embrione in sviluppo. E anche nel nostro modello i valori numerici dei nove geni significano qualcosa solo dopo essere stati tradotti in regole di accrescimento per lo schema dell'albero che si ramifica. Possiamo però farci un'idea di che cosa faccia ogni gene confrontando il corpo di due organismi che sappiamo differire solo in relazione a un certo gene.

Compariamo, per esempio, l'albero base al centro della figura con i due alberi ai suoi due lati, e avremo una qualche idea di che cosa fa il gene 5.

Esattamente nello stesso modo si comportano anche i veri genetisti. Questi ignorano di norma in che modo i geni esercitano i loro effetti sugli embrioni, così come ignorano la formula genetica completa di ogni animale. Confrontando però il corpo di due animali adulti che differiscono, a quanto si sa, solo di un singolo gene, essi possono vedere quali siano gli effetti di tale gene. In realtà la cosa non è mai così semplice, giacché gli effetti dei geni interagiscono fra loro in modi che sono più complicati della semplice somma. Esattamente la stessa cosa vale per gli alberi elaborati dal

computer, e la corrispondenza fra i due piani è molto stretta, come vedremo nelle figure seguenti. Il lettore noterà che tutte le forme sono simmetriche attorno a un asse destra-sinistra. Questa è una costrizione imposta da me alla procedura sviluppo. Ho preso questa decisione in parte per ragioni estetiche e in parte per economizzare sul numero di geni necessari (se i geni non esercitassero effetti di specularità sui due lati dell'albero avremmo bisogno di geni separati per la parte destra e per la parte sinistra), ma anche perché speravo di riuscire a sviluppare forme simili ad animali, e la maggior parte degli animali presentano una simmetria bilaterale. Per la stessa ragione, d'ora in poi smetterò di chiamare queste creature «alberi», e li chiamerò «corpi» o «biomorfi». «Biomorfi» è il nome coniato da Desmond Morris per designare le figure vagamente simili ad animali che compaiono nei suoi dipinti surrealistici.

Questi dipinti hanno per me un particolare valore sentimentale, poiché uno di essi fu riprodotto sulla copertina del mio primo libro. Desmond Morris sostiene che i suoi biomorfi si sono «evoluti» nella sua mente, e che la loro evoluzione può essere ricostruita nei successivi dipinti.

Ma torniamo ai biomorfi del computer, e ai 18 possibili mutanti, di cui otto esempi rappresentativi sono presentati nella figura 3. Poiché ogni esempio è separato dal biomorfo centrale da una sola mutazione, è per noi facile vederli come i figli del genitore centrale. Abbiamo qui il nostro analogo della riproduzione, che, come nel caso della procedura sviluppo, possiamo includere in un altro piccolo programma per computer, pronto per essere compreso nel nostro grande programma evoluzione. Sulla riproduzione è opportuno osservare un paio di cose. In primo luogo, qui non c'è sesso; la riproduzione è asessuale. Io penso perciò i biomorfi come femmine, poiché gli animali asessuati come gli afidi hanno quasi sempre una forma fondamentalmente femminile. In secondo luogo le mie mutazioni devono presentarsi sempre una sola per volta. Nel nostro modello un figlio differisce dal suo genitore in uno solo dei suoi nove geni; ogni mutazione, inoltre, si verifica solo attraverso l'aggiunta di +1 o -1 al valore del corrispondente gene parentale. Queste sono solo convenzioni arbitrarie: esse avrebbero potuto benissimo essere diverse, rimanendo ancora biologicamente realistiche.

Ciò non vale per il seguente carattere del modello, che incarna un principio di biologia fondamentale. La forma di ciascun figlio non deriva direttamente dalla forma del genitore. Ogni figlio riceve la sua forma dai valori dei suoi nove geni (angoli di influenza e via dicendo). E ogni figlio riceve i suoi nove geni dai nove geni del suo genitore. Questo è esattamente quanto accade nella vita reale. I corpi non si trasmettono da una generazione all'altra; i geni sì. I geni influiscono sullo sviluppo embrionale del corpo in cui si trovano. Poi quegli stessi geni vengono o no trasmessi alla generazione seguente. La natura dei geni non viene modificata dalla loro partecipazione allo sviluppo corporeo, ma sulla loro probabilità di essere trasmessi alla generazione seguente può incidere il successo del corpo che essi aiutano a creare. Ecco perché, nel nostro modello, è importante che le due procedure chiamate sviluppo e riproduzione siano scritte come due compartimenti rigorosamente separati. La loro separazione è totale, facendo eccezione solo per il fatto che la riproduzione passa i valori dei geni a sviluppo, dove questi influiscono sulle regole dell'accrescimento. Lo sviluppo non ritrasmette nel modo più assoluto valori di geni alla riproduzione: una cosa del genere equivarrebbe al «lamarckismo» (vedi capitolo XI).

Abbiamo dunque combinato i nostri due moduli di programma, sviluppo e riproduzione. La riproduzione trasmette geni da una generazione all'altra, con la possibilità di mutazioni. Lo sviluppo prende i geni forniti dalla riproduzione in ogni generazione data, e li traduce in un'azione di disegno, e quindi in un'immagine di un corpo sullo schermo del computer. È venuto il momento di riunire i due moduli nel grande programma chiamato evoluzione.

L'evoluzione consiste fondamentalmente in una ripetizione senza fine della riproduzione. In ogni generazione, la riproduzione prende i geni che le vengono forniti dalla generazione precedente e li trasmette a sua volta alla generazione successiva, ma con piccoli errori casuali: le mutazioni. Una mutazione consiste semplicemente in un'aggiunta di +1 o -1 al valore di un gene scelto a caso. Ciò significa che, al passare delle generazioni, la qualità totale di differenza genetica dal progenitore originario può diventare, cumulativamente, molto grande, un piccolo passo per volta. Benché però le mutazioni siano casuali, il mutamento cumulativo nel corso delle generazioni non è affatto

casuale. In ogni generazione i figli sono diversi dal loro genitore in direzioni casuali. Non è però casuale quale individuo di quella progenie venga selezionato per trasmettere i propri geni alla generazione seguente. È a questo punto che entra in scena la selezione darwiniana. Il criterio di selezione non è fornito dai geni stessi bensì dai corpi, la cui forma è influenzata dai geni attraverso lo sviluppo.

Oltre a venire riprodotti, in ogni generazione i geni vengono anche trasmessi allo sviluppo, che governa la crescita del corpo appropriato seguendo le regole rigorose che gli sono state imposte. In ogni generazione viene visualizzata sullo schermo un'intera «figliata» (ossia l'insieme degli individui appartenenti alla generazione seguente). Tutti questi individui sono figli mutanti dello stesso genitore, dal quale differiscono ciascuno per un gene. Questa frequenza elevatissima di mutazione è un carattere distintamente abiologico del nostro programma per computer.

Nella vita reale la probabilità che un gene muti è spesso inferiore a 1 a 1.000.000. La ragione per cui ho assegnato al modello una frequenza di mutazione così elevata consiste nel fatto che la visualizzazione dei risultati sullo schermo del computer è a beneficio di occhi umani, e gli esseri umani non hanno la pazienza di attendere un milione di generazioni per osservare una mutazione! L'occhio umano ha un ruolo attivo da svolgere nella storia: quello dell'agente della selezione. È il nostro occhio a passare in rassegna l'insieme dei figli prodotti in ogni generazione e a sceglierne uno per la riproduzione controllata. L'individuo prescelto diventa quindi il genitore della generazione seguente, e sullo schermo viene visualizzata simultaneamente una figliata dei suoi figli mutanti. Qui l'occhio umano sta facendo esattamente ciò che fa nella selezione di cani di razza con pedigree o di rose pregiate. Il nostro modello, in altri termini, è a rigore un modello di selezione artificiale, non un modello di selezione naturale.

Questo criterio di «successo» non è il criterio diretto della sopravvivenza, come nella vera selezione naturale. In questa, se un corpo ha tutto ciò che gli serve per sopravvivere, i suoi geni sopravvivono automaticamente poiché sono contenuti in esso. I geni che sopravvivono tendono quindi a essere, automaticamente, quei geni che conferiscono ai corpi le qualità utili per sopravvivere. Nei modelli elaborati dal computer il criterio selettivo non è la sopravvivenza bensì la capacità di colpire il ghiribizzo umano. Non necessariamente un ghiribizzo ozioso, fortuito, poiché noi possiamo decidere di selezionare costantemente in funzione di qualche qualità, come la «somiglianza a un salice piangente». Secondo la mia esperienza, però, il selezionatore umano è più spesso capriccioso e opportunistico. Anche questo modo di procedere non è dissimile da certi tipi di selezione naturale. L'essere umano dice al computer da quale dei figli di ciascuna generazione debba essere procreata la generazione successiva. I geni dell'individuo prescelto vengono trasmessi alla riproduzione, e da qui prende l'avvio la generazione seguente. Questo processo, come l'evoluzione biologica reale, prosegue indefinitamente. Ogni biomorfo differisce dal proprio genitore e dalla generazione successiva solo di un singolo passo, una singola mutazione. Dopo cento generazioni di evoluzione, però, i biomorfi possono essere separati dal loro progenitore originario da un massimo di cento mutazioni. E in cento mutazioni, può accadere veramente molto.

Io non avrei mai immaginato quanto, quando cominciai per la prima volta a giocare col programma evoluzione che avevo appena scritto. La cosa che mi sorprese di più fu il fatto che i biomorfi possono cessare molto presto di assomigliare ad alberi. La struttura basilare della ramificazione in due direzioni è sempre presente, ma viene facilmente occultata quando le linee si incrociano e reincrociano, creando masse piene di colore (soltanto bianco e nero nelle figure stampate). La figura 4 illustra una particolare storia evolutiva formata da non più di 29 generazioni. Il progenitore è una minuscola creatura, un singolo punto. Benché il suo corpo sia così piccolo, simile a un batterio nel limo primordiale, al suo interno è racchiuso il potenziale per ramificarsi esattamente secondo lo schema dell'albero centrale della figura 3: solo che il suo gene 9 gli dice di ramificarsi zero volte. Tutti gli esseri raffigurati nella pagina sono discesi dal punto ma, per evitare di stipare la pagina, non ho stampato tutti i discendenti che ho realmente osservato, limitandomi a presentare, per ogni generazione, solo il figlio che ha avuto successo (cioè il genitore di ogni generazione successiva), e a volte uno o due dei suoi fratelli (o meglio, come abbiamo detto, sorelle) che non hanno avuto successo. La figura ci mostra quindi fondamentalmente solo la linea principale dell'evoluzione,

guidata dalla mia selezione estetica. Sono illustrati però tutti gli stadi nella linea principale. Consideriamo ora brevemente le primissime generazioni della linea principale dell'evoluzione della figura 4. Nella generazione 2 il punto diventa una Y. Nelle due generazioni seguenti la Y diventa più grande. Poi i rami cominciano a incurvarsi lievemente, e l'organismo assume una figura che assomiglia a una fionda.

Nella generazione 7 la curva si accentua, cosicché i due rami finiscono quasi per incontrarsi. I rami incurvati diventano sempre più grandi e nella generazione 8 ognuno di essi acquista un paio di piccole appendici. Nella generazione 9 queste appendici sono andate di nuovo perdute e il fusto della fionda diventa più lungo.

La generazione 10 assomiglia alla sezione di un fiore, e i rami laterali ricurvi sembrano petali che racchiudono un'appendice centrale o «stigma». Nella generazione 11 la stessa forma a «fiore» è diventata più grande e leggermente più complicata.

Non intendo proseguire questa descrizione commentata. La figura parla da sé, per tutte le 29 generazioni. Si osservi come ciascuna generazione sia solo leggermente diversa dal suo genitore e dalle proprie sorelle. Poiché ciascun individuo è un po' diverso dal proprio genitore, è prevedibile che sarà leggermente più diverso dai propri nonni (e dai propri nipoti) e ancor più diverso dai bisnonni (e dai bisnipoti). Questo è ciò che si verifica nell'evoluzione cumulativa anche se, a causa della nostra elevata frequenza di mutazione, l'abbiamo qui accelerata a ritmi irrealistici. Perciò la figura 4 assomiglia più alla genealogia di una specie che a una genealogia di individui, ma il principio è lo stesso.

Quando scrissi il programma, non pensavo che esso avrebbe sviluppato qualcosa oltre una varietà di forme ad albero. Avevo sperato di ottenere salici piangenti, cedri del Libano, pioppi cipressini, alghe marine, e forse le corna ramate di cervi. Nulla nella mia intuizione di biologo, nulla nella mia esperienza ventennale di programmatore di computer e nulla nei miei sogni più sfrenati mi preparava a ciò che comparve in realtà sullo schermo. Posso ricordare esattamente quando, nella sequenza delle generazioni, cominciai a balenarmi per la prima volta la possibilità che tale evoluzione potesse produrre qualcosa di simile a un insetto. Colpito da quest'idea cominciai a selezionare, una generazione dopo l'altra, il figlio che mi sembrava ogni volta più simile a un insetto. La mia incredulità cresceva parallelamente all'evolversi della somiglianza. Il lettore può vedere i risultati nella figura 4 in basso. Devo ammettere che questi biomorfi hanno otto zampe come i ragni, anziché sei come gli insetti, ma ciò nonostante non posso nascondere il sentimento di esultanza che provai vedendo emergere queste creature squisite dinanzi ai miei occhi. Udii distintamente nella mia testa le trionfali note iniziali del poema sinfonico *Also sprach Zarathustra* (il tema di 2001 Odissea nello spazio). Non riuscii a mangiare, e quella notte i «miei» insetti sciamavano dietro le mie palpebre mentre tentavo invano di dormire.

Sul mercato ci sono videogiochi in cui si ha l'illusione di vagare in un labirinto sotterraneo, che ha una geografia ben definita anche se complessa e in cui ci si imbatte in draghi, minotauri o altri avversari mitici. In questi giochi i mostri sono in numero piuttosto piccolo. Essi sono tutti disegnati da un programmatore umano e lo stesso vale anche per la geografia del labirinto. Nel gioco dell'evoluzione, si tratti della versione computerizzata o della cosa reale, il giocatore (o l'osservatore) prova la stessa sensazione di vagare metaforicamente attraverso un labirinto di passaggi ramificati, ma il numero di percorsi possibili è quasi infinito e i mostri che si incontrano non sono stati disegnati deliberatamente e sono imprevedibili. Nei miei vagabondaggi nelle regioni più remote del Paese dei Biomorfi mi sono imbattuto in gamberi fatati, in templi aztechi, in vetrate di cattedrali gotiche, in disegni primitivi di canguri e, in un'occasione memorabile ma irripetibile, in una passabile caricatura del Wykeham Professor di logica. La figura 5 è un'altra piccola collezione tratta dalla mia stanza dei trofei, sviluppati tutti nello stesso modo. Io desidero sottolineare che queste forme non sono state disegnate da artisti; esse non sono state ritoccate o modificate in alcun modo, ma sono esattamente come le disegnò il computer quando si svilupparono al suo interno. Il ruolo dell'occhio umano si limitò a compiere un'azione di selezione fra la progenie mutata in modo casuale nel corso di molte generazioni di evoluzione cumulativa.

Abbiamo ora un modello di evoluzione molto più realistico di quello fornitoci dalle scimmie

dattilografe che tentavano di riscrivere Shakespeare. Ma il modello dei biomorfi è ancora carente. Esso ci mostra il potere della selezione cumulativa di generare una varietà quasi infinita di forme quasi biologiche, ma usa la selezione artificiale, non la selezione naturale. A operare la selezione è l'occhio umano. Non potremmo fare a meno dell'occhio umano, e lasciare al computer stesso l'incombenza di operare la selezione sulla base di un qualche criterio biologicamente realistico? La cosa è più difficile di quanto possa sembrare. Val la pena di spendere un po' di tempo a spiegare perché.

È di una facilità addirittura banale selezionare una particolare formula genetica, purché si possano leggere i geni di tutti gli animali. Ma la selezione naturale non sceglie i geni direttamente, bensì sceglie gli effetti che i geni hanno sui corpi, chiamati tecnicamente effetti fenotipici. L'occhio umano è molto abile nella scelta di effetti fenotipici, come dimostrano le numerose razze di cani, bovini, piccioni e come dimostra anche, se mi è lecito dirlo, la figura 5. Per far sì che fosse il computer a scegliere direttamente gli effetti fenotipici, dovremmo scrivere un programma di riconoscimento delle figure. Programmi di riconoscimento di figure esistono già. Essi vengono usati per leggere testi stampati e persino testi scritti a mano. Sono però programmi difficili, molto perfezionati e richiedono computer molto potenti e veloci. Quand'anche un tale programma di riconoscimento di figure non fosse superiore alle mie capacità di programmazione e alla capacità del mio piccolo computer da 64 kilobyte, non mi darei pensiero di scriverlo. Questo è infatti un compito che viene svolto meglio dall'occhio umano, congiuntamente - e questo è l'elemento più importante - al computer da 10 giganeuroni all'interno del nostro cranio.

Non sarebbe troppo difficile far compiere al computer una selezione in funzione di caratteri generali vaghi come, diciamo, una forma alta e sottile, una forma bassa e tozza, o forse anche una forma curvilinea, una forma a punta o addirittura un'ornamentazione rococò. Un metodo potrebbe essere quello di programmare il computer a ricordare i tipi di qualità che gli esseri umani hanno prediletto in passato e a esercitare una selezione continuata dello stesso tipo generale in futuro. Questo modo di procedere non ci condurrebbe però più vicini a simulare la selezione naturale. Il punto importante è che la natura non ha bisogno di una capacità di elaborazione computerizzata dell'informazione per compiere la sua selezione, tranne in casi speciali come la scelta del pavone maschio da parte della femmina. In natura l'agente selettivo è di solito diretto, forte e semplice. È la falce della crudele mietitrice. Ovviamente le ragioni per la sopravvivenza sono tutt'altro che semplici: ecco perché la selezione naturale può costruire animali e piante tanto complessi. Ma nella morte stessa c'è qualcosa di molto crudo e semplice. Una morte non casuale è tutto ciò che si richiede per selezionare in natura i fenotipi, e quindi i geni che essi contengono.

Per simulare in un modo interessante nel nostro programma per computer la selezione naturale, dovremmo dimenticarci dell'ornamentazione rococò e di ogni altra qualità definita visivamente, concentrandoci, invece, sulla simulazione del carattere non casuale della morte. I biomorfi dovrebbero interagire, nel computer, con la simulazione di un ambiente ostile. Qualcosa nella loro forma dovrebbe determinare se essi sopravviverebbero o no in tale ambiente. Idealmente, l'ambiente ostile dovrebbe comprendere altri biomorfi in evoluzione: «predatori», «prede», «parassiti», «competitori». Dovrebbe essere la forma particolare di un biomorfo preda a determinare la sua probabilità di essere catturato, per esempio, da biomorfi predatori di forme particolari. Tali criteri di vulnerabilità non dovrebbero essere inclusi nel programma bensì dovrebbero emergere in modo simile a quello in cui emergono le forme stesse. Prenderebbe allora realmente l'avvio l'evoluzione nel computer, poiché sarebbero soddisfatte le condizioni per una «corsa agli armamenti» autorinforzantesi (vedi capitolo VII), e io non oso congetturare se si arriverebbe mai a una fine. Purtroppo penso che tentare di creare un tale mondo artificiale sia un compito superiore alle mie capacità di programmatore.

Se c'è qualcuno abbastanza bravo per realizzare questo obiettivo, dovrebbero essere i programmatori che sviluppano i rumorosi e volgari videogiochi derivati da Space Invaders. In tali programmi viene simulato un mondo artificiale. Esso ha una sua geografia, spesso in tre dimensioni, e una dimensione temporale in rapido movimento. Vari esseri sfrecciano in uno spazio tridimensionale simulato, entrando in collisione fra loro, sparandosi, inghiottendosi con rumori

rivoltanti. La simulazione può essere così buona da far provare al giocatore che manovra il joystick una forte illusione di far parte di quel mondo contraffatto. Io immagino che il culmine di questo tipo di programmazione venga conseguito nelle cabine usate per l'addestramento di piloti di aerei e di veicoli spaziali. Persino questi programmi sono roba insignificante rispetto al programma che si dovrebbe scrivere per simulare una «corsa agli armamenti» emergente fra predatori e prede, incorporata in un ecosistema simulato completo. Un compito del genere sarebbe però certamente realizzabile. Se c'è un programmatore professionista che avesse piacere a collaborare nel far fronte a una sfida così difficile, mi piacerebbe se si mettesse in contatto con me.

Frattanto c'è una cosa molto più facile, che intendo provare la prossima estate. Metterò il computer in un posto in ombra in giardino. Lo schermo può presentare immagini a colori. Io ho già una versione del programma che usa alcuni «geni» in più per controllare il colore, in modo simile a quello in cui gli altri nove geni controllano la forma. Comincerò con qualche biomorfo più o meno compatto e dai colori vivaci. Il computer visualizzerà simultaneamente una varietà di figli mutanti del biomorfo, i quali ne differiranno nella forma e/o nel colore. Io credo che api, farfalle e altri insetti visiteranno lo schermo e opereranno una «scelta», andando a urtare contro una particolare macchia sullo schermo stesso. Quando saranno state registrate un certo numero di scelte, il computer «procreerà» a partire dal biomorfo preferito una nuova generazione di prole mutante e la visualizzerà sullo schermo.

Io spero molto che, nell'arco di un gran numero di generazioni, gli insetti selvatici possano causare veramente l'evoluzione di «fiori» nel computer. Se sarà così, i fiori del computer si saranno evoluti esattamente sotto la stessa pressione di selezione che ha causato l'evoluzione dei fiori reali in natura. Io sono incoraggiato nella mia speranza dal fatto che gli insetti visitano spesso chiazze di colori brillanti sui vestiti delle donne (e anche da esperimenti più sistematici che sono stati pubblicati). Una possibilità alternativa, che troverei ancor più eccitante, è che gli insetti selvatici possano causare l'evoluzione di forme simili agli insetti. Il precedente che legittima questa mia speranza è costituito da quelle api e vespe che in passato causarono l'evoluzione di alcune specie di orchidee. Nel corso di molte generazioni di evoluzione cumulativa delle orchidee, i maschi di questi imenotteri determinarono l'evolversi in queste di una figura sempre più simile a quella di api o vespe attraverso i loro tentativi di copulare con questi fiori, tentativi che comportarono per la pianta la diffusione del loro polline con l'aiuto di tali insetti. Immagina come sarebbe il «fiore in forma di ape» della figura 5 a colori. Non stuzzicherebbe i tuoi appetiti se tu fossi un'ape?

Quanto alla mia principale ragione di pessimismo, si fonda sul fatto che negli insetti la visione funziona in un modo molto diverso dal nostro. I teleschermi sono progettati per gli occhi umani e non per quelli delle api. Questo fatto potrebbe facilmente significare che, benché tanto a noi quanto alle api - nonostante le grandi differenze esistenti nel nostro modo di vedere - certe specie di orchidee appaiano simili alle api, le api potrebbero non vedere affatto le immagini che noi vediamo su un teleschermo.

Le api potrebbero infatti non vedere altro che 625 linee di scansione! Ciò nonostante, vale la pena di fare un tentativo. Quando questo libro sarà pubblicato conoscerò la risposta.

C'è uno stereotipo popolare, espresso di solito nei toni che Stephen Potter avrebbe chiamato «grossolani», che dice che non si può ricavare dal computer più di quanto ci si mette. Secondo altre versioni, i computer fanno esattamente ciò che noi diciamo loro di fare, e perciò non sono mai creativi. Lo stereotipo è vero solo in un senso assolutamente banale, lo stesso senso in cui è vero che Shakespeare non scrisse mai nulla di più di ciò che gli insegnò a scrivere il suo primo maestro di scuola: ossia parole.

Io ho scritto il programma evoluzione e l'ho introdotto nel computer, ma non ho pianificato i «miei» insetti, lo scorpione, lo Spitfire, o il modulo lunare. In principio non avevo la più pallida idea di che cosa sarebbe emerso: ecco perché «emergere» è la parola giusta. È vero che sono stati i miei occhi a operare la selezione che ha guidato la loro evoluzione, ma in ogni fase il mio intervento si è limitato a una frazione minima della prole offerta dalla mutazione casuale, e la mia «strategia» selettiva è stata comunque opportunistica, capricciosa e a breve termine. Io non miravo a un obiettivo lontano e lo stesso vale per la selezione naturale.

Posso illustrare in modo teatrale questa situazione discutendo l'unica volta in cui ho tentato di mirare a un obiettivo lontano. Innanzitutto devo fare una confessione. È una cosa che il lettore avrà in ogni caso già sospettato. La storia evolutiva della figura 4 è una ricostruzione. Non fu quella la prima volta che io vidi i «miei» insetti. Quando essi emersero in origine al suono delle trombe, non avevo alcun mezzo per registrarne i geni. Li vedevo dinanzi a me, sullo schermo del mio computer, e non potevo conseguire una conoscenza più approfondita, non avevo alcuna possibilità di decifrarne i geni. Non mi decidevo a spegnere il computer, mentre mi spremerevo il cervello nel vano tentativo di cercare qualche mezzo per conservarli, ma non ci fu nulla da fare. I geni erano sepolti troppo in profondità, esattamente come nella vita reale. Potei stampare delle immagini del corpo degli insetti, ma avevo perduto i loro geni. Modificai immediatamente il programma in modo da conservare per il futuro documentazioni accessibili di formule genetiche, ma per quella volta era troppo tardi. Avevo perso i miei insetti.

Mi accinsi al tentativo di «ritrovarli». Se si erano evoluti una volta, sembrava possibile che potessero evolversi ancora. Come l'accordo perduto, mi ossessionavano. Vagai nel Paese dei Biomorfi, camminando attraverso un paesaggio infinito di creature strane e oggetti esotici, ma non riuscii a ritrovarli. Sapevo che dovevano essere acquattati da qualche parte. Conoscevo i geni da cui l'evoluzione originaria aveva preso l'avvio. Avevo un'immagine del loro corpo. Avevo persino un'immagine della sequenza di corpi che conducevano ai miei insetti attraverso una lenta evoluzione a partire da un progenitore costituito da un punto. Ma non conoscevo la loro formula genetica.

Il lettore potrebbe pensare che sia stato abbastanza facile ricostruire il percorso evolutivo, ma non fu così. La ragione, sulla quale tornerò più avanti, è il numero astronomico dei possibili biomorfi che un percorso evolutivo sufficientemente lungo può offrire, persino quando ci sono solo nove geni che variano. Varie volte nel mio pellegrinaggio nel Paese dei Biomorfi mi parve di essere vicino a un precursore dei miei insetti ma poi, nonostante i miei sforzi migliori come agente selettivo, l'evoluzione si avviò su quella che risultò essere una falsa pista. Infine, durante i miei vagabondaggi evolutivi nel Paese dei Biomorfi - il senso di trionfo non fu molto inferiore a quello provato nella prima occasione - riuscii finalmente a rimetterli alle strette.

Non sapevo (e non lo so ancora) se questi insetti fossero esattamente uguali ai miei originali, gli insetti «accordi perduti di Zarathustra», o se fossero solo superficialmente «convergenti» (vedi il capitolo seguente), ma il risultato era abbastanza buono. Questa volta non c'era alcun errore: scrissi la formula genetica e oggi sono in grado di far «evolvere» insetti ogni volta che lo voglio.

Certo, sto usando dei toni un po' teatrali, ma ce da fare un'osservazione seria. Il succo della storia è che, anche se sono stato io a programmare il computer, dicendogli con grande abbondanza di particolari che cosa doveva fare, non sono nondimeno stato io a pianificare gli animali che si sono evoluti, e sono rimasto del tutto sorpreso quando ho visto per la prima volta i loro precursori. Ero così impotente a controllare l'evoluzione che, persino quando ho voluto espressamente ricostruire un particolare percorso evolutivo, questo compito si è rivelato quasi impossibile. Io non credo che avrei mai ritrovato i miei insetti se non avessi avuto un'immagine stampata della serie completa dei loro precursori, e persino allora la cosa è stata difficile e tediosa.

L'impotenza del programmatore a controllare o predire il corso dell'evoluzione nel computer sembra paradossale? Ciò significa forse che qualcosa di misterioso, o persino di mistico, stava accadendo nel computer? Ovviamente no. Né c'è qualcosa di mistico nell'evoluzione di animali e piante reali. Noi possiamo usare il modello del computer per risolvere il paradosso, e imparare nel corso di questo processo qualcosa sull'evoluzione reale.

Per anticipare le grandi linee della mia argomentazione, la base della risoluzione del paradosso risulterà come segue. C'è una serie ben definita di biomorfi, ciascuno dei quali occupa in permanenza il suo posto unico in uno spazio matematico. Esso risiede in permanenza in quello spazio nel senso che, se ne conoscessimo la formula genetica, potremmo trovarlo istantaneamente; inoltre, i suoi vicini in questo speciale tipo di spazio sono i biomorfi che differiscono da esso in un solo gene. Ora che conosco la formula genetica dei miei insetti, posso riprodurli a volontà, e posso dire al computer di produrre un'«evoluzione» verso di essi a partire da un punto di partenza

arbitrario. Quando riusciamo a far evolvere per la prima volta una nuova creatura per selezione artificiale nel nostro modello, abbiamo l'impressione di trovarci dinanzi a un processo creativo. E così è effettivamente, anche se in realtà quel che stiamo facendo è solo di trovare tale creatura, poiché essa si trova già, in un senso matematico, nel suo posto nello spazio genetico del Paese dei Biomorfi. Il motivo per cui questo è un processo veramente creativo è che trovare una qualsiasi creatura è estremamente difficile, per la semplice ragione che il Paese dei Biomorfi è estremamente vasto, e il numero totale di creature che vi risiedono è pressoché infinito. Una tale ricerca non può certo essere condotta in modo puramente casuale, ma è necessario adottare una procedura di ricerca più efficiente, creativa.

Alcune persone credono ingenuamente che i computer che giocano a scacchi provino dentro di sé tutte le possibili combinazioni di mosse. Esse trovano confortante questo pensiero quando un computer le batte, ma la loro convinzione è del tutto falsa. Il numero delle mosse possibili nel gioco degli scacchi è troppo elevato: lo spazio di ricerca è miliardi di volte troppo grande per permettere il successo di una ricerca puramente casuale. L'arte di scrivere un buon programma per scacchi consiste nel saper escogitare efficienti scorciatoie nello spazio di ricerca. La selezione cumulativa, sia essa una selezione artificiale come nel nostro modello dei biomorfi o la selezione naturale nel mondo reale, è una procedura di ricerca efficiente, e le sue conseguenze sembrano molto simili all'intelligenza creativa.

Questo, dopo tutto, è il nucleo su cui ruota l'argomento del disegno divino di William Paley. Tecnicamente, tutto ciò che stiamo facendo quando giochiamo al gioco dei biomorfi col computer, è di trovare animali che, in senso matematico, attendono solo di essere trovati. Questa attività sembra simile a un processo di creazione artistica. La ricerca in un piccolo spazio, in cui si trovino solo poche entità, non assomiglia di solito a un processo creativo. Un gioco infantile di ricerca del ditale non sembra affatto creativo. Il procedimento di rivoltare oggetti a caso nella speranza di trovare sotto di essi l'oggetto che si cerca funziona, di solito, solo quando lo spazio in cui si deve condurre la ricerca è piccolo. Quando lo spazio di ricerca diventa più grande, si richiedono procedure di ricerca sempre più complesse. Quando lo spazio di ricerca sia sufficientemente grande, le procedure di ricerca diventano indistinguibili dalla vera creatività.

Il modello dei biomorfi illustra tutto questo molto bene, oltre a costituire un ponte istruttivo fra i processi creativi umani, come la pianificazione di una strategia vincente a scacchi, e la creatività evolutiva della selezione naturale, l'orologiaio cieco. A questo scopo dobbiamo sviluppare l'idea del Paese dei Biomorfi come «spazio» matematico, una prospettiva infinita ma ordinata della varietà morfologica, nella quale ogni creatura occupa il suo posto appropriato, in attesa di essere scoperta. Gli organismi della figura 5 non sono disposti sulla pagina in alcun ordine speciale. Nel Paese dei Biomorfi ciascuno di essi occupa invece la sua posizione unica, determinata dalla sua formula genetica, ed è circondato da vicini ben precisi. Tutte le creature nel Paese dei Biomorfi hanno un rapporto spaziale ben definito l'una con l'altra. Che cosa significa ciò? Quale significato possiamo attribuire alla posizione spaziale?

Lo spazio di cui stiamo parlando è lo spazio genetico. Ogni animale ha la sua propria posizione nello spazio genetico. I vicini prossimi nello spazio genetico sono animali che differiscono fra loro solo per una singola mutazione. Nella figura 3 l'albero base in centro è circondato da 8 dei suoi 18 vicini immediati nello spazio genetico. I 18 vicini di un animale sono i 18 tipi diversi di figli a cui esso può dare origine, e i 18 tipi diversi di genitori da cui avrebbe potuto avere origine, date le regole del nostro modello computerizzato. Se si passa ai parenti di secondo grado, ogni animale ha 324 (18×18) vicini (ignorando per semplicità le mutazioni regressive), ossia l'insieme dei suoi possibili nipoti abiativi, nonni, zii e nipoti. Se si considerano anche i parenti di terzo grado, ogni animale ha 5832 ($18 \times 18 \times 18$) vicini, il complesso dei possibili bisnipoti, bisnonni, cugini primi ecc.

Quale vantaggio c'è nel pensare nei termini di spazio genetico?

Dove ci condurrà questo modo di procedere? La risposta è che esso ci fornisce un modo per comprendere l'evoluzione come un processo graduale, cumulativo. In ogni generazione, secondo le regole del nostro modello, è possibile compiere un solo passo nello spazio genetico. In 29

generazioni non è possibile allontanarsi per più di 29 passi dal progenitore di partenza. Ogni storia evoluzionistica consiste in un itinerario, o una traiettoria, particolare attraverso lo spazio genetico. Per esempio, la storia evoluzionistica registrata nella figura 4 è una particolare traiettoria a meandri attraverso lo spazio genetico, la quale connette un punto a un «insetto» passando per 28 stadi intermedi. È questo che io intendo quando parlo metaforicamente di «vagare» nel Paese dei Biomorfi.

Volevo tentare di rappresentare questo spazio genetico nella forma di un'illustrazione. Il guaio è che le illustrazioni sono bidimensionali. Lo spazio genetico in cui questi biomorfi risiedono non è uno spazio bidimensionale. Esso non è neppure uno spazio tridimensionale: è uno spazio a nove dimensioni! (La cosa importante da ricordarsi sulla matematica è quella di non lasciarsi spaventare. Essa non è difficile come pretendono a volte i sacerdoti di questa religione. Ogni volta che mi sento intimidito richiamo sempre alla mente la frase di Silvanus Thompson nel Calcolo infinitesimale: reso facile: «Ciò che può fare un cretino, può farlo anche un altro cretino».) Se noi sapessimo disegnare in nove dimensioni, potremmo far corrispondere ciascuna dimensione a uno dei nove geni. Il mutamento evoluzionistico consiste in una camminata passo passo attraverso lo spazio a nove dimensioni. La quantità di differenza genetica fra un animale e un altro - e quindi il tempo impiegato per passare per evoluzione dall'uno all'altro e la difficoltà di un tale passaggio evolutivo - è misurata dalla distanza che divide i due organismi nello spazio a nove dimensioni.

Purtroppo noi non sappiamo disegnare in nove dimensioni.

Ho cercato un modo per aggirare questa difficoltà, per disegnare uno spazio bidimensionale che dia un'idea di come ci si possa muovere da un punto all'altro nello spazio genetico a nove dimensioni del Paese dei Biomorfi. Ci sono vari modi possibili in cui lo si può fare, e io ho scelto quello che chiamo il trucco dei triangoli. Osserviamo la figura 6. Ai tre vertici del triangolo ci sono tre biomorfi scelti ad arbitrio. Quello in alto è l'albero base, quello a sinistra è uno dei «miei» insetti e quello a destra non ha un nome ma pensavo che avesse un aspetto degno di nota. Come tutti i biomorfi, ognuno di questi tre aveva la sua propria formula genetica, la quale determina la sua posizione unica nello spazio genetico a nove dimensioni.

Il triangolo si trova su un «piano» bidimensionale che interseca l'ipervolume a nove dimensioni (ciò che può fare un cretino, può farlo anche un altro cretino). Il piano è come un pezzo di vetro piano in mezzo a una gelatina. Sul vetro è disegnato il triangolo, e inoltre alcuni dei biomorfi che, in virtù della loro formula genetica, si trovano su quel particolare piano. Che cos'è che li abilita a trovarsi su quel particolare piano? È a questo punto che entrano in gioco i tre biomorfi ai tre vertici del triangolo. Essi sono chiamati i biomorfi di riferimento.

Ricordiamo che il concetto di «distanza» nello «spazio» genetico significa che biomorfi geneticamente simili sono vicini prossimi, mentre biomorfi geneticamente diversi si trovano in posizioni lontane fra loro. Sul piano particolare che stiamo considerando, le distanze sono calcolate tutte in relazione ai tre biomorfi di riferimento. Per ogni punto dato sulla lastra di vetro, sia all'interno del triangolo sia al suo esterno, la formula genetica appropriata per quel punto è calcolata come una «media ponderata» delle formule genetiche dei tre biomorfi di riferimento. Il lettore avrà già intuito come si calcola una media ponderata. La si calcola attraverso le distanze sulla pagina, e più precisamente attraverso la vicinanza del punto in questione ai tre biomorfi di riferimento. Così, quanto più i biomorfi locali sono vicini all'insetto sul piano tanto più sono simili a insetti.

Man mano che ci si muove lungo il piano verso l'albero, gli «insetti» diventano gradualmente sempre meno simili a insetti e sempre più simili ad alberi. Procedendo verso il centro del triangolo, gli animali in cui ci si imbatte, per esempio il ragno con una menorah sulla testa, corrisponderanno a vari «compromessi genetici» fra i tre biomorfi di riferimento.

Ma questo modo di esporre le cose concede una preminenza eccessiva ai tre biomorfi di riferimento. È vero che il computer li ha usati per calcolare la formula genetica appropriata per ogni punto nel disegno. In realtà, però, tre punti di riferimento a piacere sul piano avrebbero assolto altrettanto bene questo compito, e avrebbero fornito risultati identici. Per questa ragione nella figura 7 non ho disegnato il triangolo. La figura 7 è esattamente lo stesso tipo di immagine della figura 6, solo che illustra un piano diverso. Lo stesso insetto è uno dei tre punti di riferimento, questa volta quello di

destra. Gli altri punti di riferimento, in questo caso, sono lo Spitfire e il fiore in forma di ape, entrambi come sono raffigurati nella figura 5. Anche su questo piano si può notare che i biomorfi vicini si assomigliano fra loro più di biomorfi lontani. Lo Spitfire, per esempio, fa parte di una squadriglia di aerei simili che volano in formazione.

Poiché l'insetto si trova su entrambi i piani, si può pensare che questi si intersechino a un certo angolo. Relativamente alla figura 6, si dice che il piano della figura 7 è «ruotato attorno» all'insetto. L'eliminazione del triangolo rappresenta un miglioramento del nostro metodo, giacché il triangolo conferiva una preminenza indebita a tre punti particolari nel piano. Abbiamo però ancora un altro miglioramento da introdurre. Nelle figure 6 e 7 la distanza spaziale rappresenta la distanza genetica, ma la scala è distorta. Un centimetro in altezza non vi equivale necessariamente a un centimetro in larghezza. Per ovviare a questo inconveniente, dobbiamo scegliere con cura i nostri tre biomorfi di riferimento, in modo che le distanze genetiche che li dividono siano tutte uguali. La figura 8 soddisfa esattamente queste condizioni. Anche in questo caso il triangolo non è disegnato. I tre biomorfi di riferimento sono lo scorpione della figura 5, di nuovo l'insetto (abbiamo in questo caso un'altra «rotazione attorno all'insetto»), e il biomorfo piuttosto vago in alto. Questi tre biomorfi si trovano tutti a 30 mutazioni di distanza l'uno dall'altro.

Ciò significa che è altrettanto facile evolversi da ciascuno di loro a ciascun altro. In tutt'e tre questi casi si deve compiere un minimo di 30 passi genetici. I trattini che dividono la linea orizzontale lungo il margine inferiore della figura 8 rappresentano unità di distanza misurate in geni. Possiamo considerare la linea graduata come una sorta di regolo genetico. Il regolo non funziona solo nella direzione orizzontale. Lo si può inclinare in qualsiasi direzione e misurare la distanza genetica, e quindi il tempo di evoluzione minimo, fra qualsiasi punto sul piano e qualsiasi altro (è un po' irritante il fatto che ciò non è del tutto vero sulla pagina, perché la stampante del computer distorce le proporzioni; quest'effetto è troppo banale per preoccuparsene troppo, anche se ciò significa che si avranno facilmente dei risultati sbagliati se ci si limita semplicemente a contare i trattini sulla scala).

Questi piani bidimensionali che intersecano lo spazio genetico a nove dimensioni danno un'idea di che cosa significhi muoversi nel Paese dei Biomorfi. Per migliorare tale sensazione, si deve ricordare che l'evoluzione non è limitata a quel piano. In un autentico percorso evolutivo si può passare in ogni istante in un altro piano, per esempio dal piano della figura 6 al piano della figura 7 (in vicinanza dell'insetto, dove i due piani si avvicinano l'uno all'altro).

Ho detto che il «regolo genetico» della figura 8 ci consente di calcolare il tempo minimo richiesto per evolversi da un punto all'altro. E così è in conseguenza delle restrizioni poste al modello originario, ma l'accento qui è sulla parola minimo. Poiché l'insetto e lo scorpione sono a 30 unità genetiche di distanza l'uno dall'altro, si richiedono solo 30 generazioni per evolversi dall'uno all'altro se non si è mai presa una direzione sbagliata, ossia se si sa esattamente verso quale formula genetica ci si stia dirigendo, e come si debba puntare verso di essa. Nell'evoluzione reale non c'è però nulla che corrisponda a dirigersi verso un qualche bersaglio genetico lontano.

Usiamo ora i biomorfi per tornare al punto già sottolineato a proposito delle scimmie che battono a macchina l'Amleto, l'importanza di mutamenti gradualmente, passo passo, nell'evoluzione, contrapposti al puro caso. Cominciamo col rietichettare in unità diverse le graduazioni sulla linea al fondo della figura 8. Anziché misurare la distanza come il «numero di geni che devono mutare nell'evoluzione», ci accingiamo a misurarla come la «probabilità di superare quella distanza, per mera fortuna, in un solo salto». Per riflettere su questo punto dobbiamo ora allentare una delle restrizioni che ho incluso nel «videogioco»: termineremo questo capitolo vedendo per quale ragione io abbia incorporato in principio quella restrizione nel programma. La restrizione era che ai figli veniva «consentito» di discostarsi di una sola mutazione dai loro genitori. In altri termini, era permessa la mutazione di un solo gene per volta, e a quel gene veniva permesso di mutare il suo «valore» solo di +1 o di -1.

Allentando la restrizione, diamo ora licenza a un numero qualsiasi di geni di mutare contemporaneamente, e di aggiungere un numero a piacere, positivo o negativo, al loro valore corrente. Questa è in realtà una libertà eccessiva, dato che consente ai valori genetici di spaziare fra meno infinito e più infinito. Possiamo rimediare a questo inconveniente limitando i valori dei geni a

cifre singole, ossia permettendo loro di variare fra -9 e +9.

Così, all'interno di questi limiti molto più ampi, noi consentiamo teoricamente alla mutazione di cambiare in un sol tratto, in una singola generazione, una qualsiasi combinazione dei nove geni. Inoltre il valore di ciascun gene può mutare di qualsiasi quantità, purché non vada a finire nell'ordine delle due cifre.

Che cosa significa ciò? Significa che, teoricamente, nel corso di una singola generazione, l'evoluzione può saltare da un punto qualsiasi nel Paese dei Biomorfi a un altro punto qualsiasi. Non solo a un punto qualsiasi sul piano, ma a un punto qualsiasi nell'intero ipervolume a nove dimensioni. Se, per esempio, volessimo saltare in un sol balzo dall'insetto alla volpe nella figura 5, ecco la ricetta. Aggiungere ai valori dei geni da 1 a 9 i numeri seguenti, rispettivamente: -2, 2, 2, -2, 2, 0, -4, -1, 1. Poiché però stiamo parlando di salti casuali, tutti i punti nel Paese dei Biomorfi sono altrettanto probabili come destinazione di uno di questi salti. È quindi facile calcolare la probabilità di saltare in una qualsiasi destinazione particolare, per esempio la volpe, per mero caso. La probabilità è data semplicemente dall'inverso del numero totale dei biomorfi nello spazio. Come il lettore può vedere, ci stiamo avventurando in un altro calcolo astronomico.

Ci sono 9 geni, ciascuno dei quali può assumere uno qualsiasi di 19 valori. Il numero totale dei biomorfi che potremmo raggiungere in un singolo balzo è di 19 moltiplicato per se stesso 8 volte: 19 elevato a 9. Il totale è di più di 300 miliardi di biomorfi, un valore molto modesto se paragonato al «numero dell'emoglobina» di Asimov, ma comunque un numero che si può definire ancora piuttosto grande. Se fossimo partiti dall'insetto e avessimo cominciato a saltare come una pulce impazzita per 300 miliardi di volte, avremmo potuto attenderci di pervenire una volta alla volpe.

Che cosa ci dice tutto questo sull'evoluzione reale? Ancora una volta viene ribadita l'importanza del mutamento graduale un passo dopo l'altro. Ci sono stati evoluzionisti che hanno negato la necessità di un gradualismo di questo genere nell'evoluzione. Il nostro calcolo dei biomorfi ci mostra esattamente una ragione per cui il mutamento graduale, un passo dopo l'altro, è importante. Quando dico che possiamo aspettarci che l'evoluzione salti dall'insetto a uno dei suoi vicini immediati, ma non che salti direttamente dall'insetto alla volpe o allo scorpione, quel che intendo dire è che, se si verificassero veramente salti genuinamente casuali, un salto dall'insetto allo scorpione sarebbe perfettamente possibile. Esso sarebbe in effetti altrettanto probabile quanto un salto dall'insetto a uno dei suoi vicini immediati. Ma esso sarebbe anche altrettanto probabile quanto un salto a un qualsiasi altro biomorfo del paese. E qui sta il guaio.

Il numero dei biomorfi del paese è infatti di oltre 300 miliardi, e se nessuno di essi è più probabile come destinazione di qualsiasi altro, la probabilità di saltare a un qualsiasi biomorfo particolare è così piccola da poter essere ignorata.

Si osservi che non ci è di alcun aiuto supporre che sia all'opera qui una potente «pressione di selezione» non casuale. Non avrebbe infatti alcuna importanza se un salto fortunato allo scorpione venisse remunerato con un premio principesco. La probabilità di compiere tale salto rimane infatti comunque di uno a più di 300 miliardi. Se però, invece di saltare, si camminasse verso quell'obiettivo un passo per volta, e se ogni volta un passo nella giusta direzione venisse premiato con una monetina, si potrebbe raggiungere lo scorpione in un tempo molto breve. Non necessariamente nel tempo più breve possibile di 30 generazioni, ma comunque molto rapidamente. In teoria il salto potrebbe assicurarci il premio più rapidamente, in un singolo balzo. Ma proprio perché il successo ha una probabilità infinitesima, una serie di piccoli passi, ciascuno dei quali costruisce sul successo accumulato dei passi precedenti, è l'unico modo possibile.

Il tono dei miei paragrafi precedenti è esposto a un fraintendimento che devo dissipare. Esso può dar l'impressione, ancora una volta, che l'evoluzione miri a bersagli lontani, puntando a cose come gli scorpioni. Come abbiamo visto, non è così. Se però pensiamo al nostro bersaglio come a qualsiasi cosa che possa migliorare le probabilità di sopravvivenza, il ragionamento rimane valido. Per avere dei figli, un animale dev'essere abbastanza efficiente da sopravvivere almeno sino all'età adulta. Può darsi che un figlio mutante di quel genitore possa essere ancora migliore ai fini della sopravvivenza. Se però un figlio muta di molto, allontanandosi di una distanza considerevole dal genitore nello spazio genetico, quali sono le probabilità che esso sia migliore del genitore? La

risposta è che tali probabilità sono in realtà molto piccole. E la ragione è la stessa che abbiamo appena visto nel caso del nostro modello dei biomorfi. Se la mutazione che stiamo considerando è un salto molto grande, il numero delle possibili destinazioni di tale salto è astronomicamente grande. E poiché, come abbiamo visto nel capitolo I, il numero dei modi diversi di essere morti è grande quanto quello dei modi diversi di essere vivi, sono molto alte le probabilità che un grande salto casuale nello spazio genetico si concluda con la morte.

Quanto più piccolo è il salto, tanto minore è invece la probabilità della morte, e tanto maggiore è la probabilità che il salto conduca a un miglioramento. Torneremo su questo argomento in un altro capitolo.

Questo è il punto fino al quale desidero spingermi nel trarre ammaestramenti dal Paese dei Biomorfi. Spero che il lettore non abbia trovato tutte queste considerazioni troppo astratte.

Esiste un altro spazio matematico, pieno non di biomorfi con nove geni ma di animali in carne e ossa composti da miliardi di cellule, ciascuna delle quali contiene decine di migliaia di geni.

Questo non è lo spazio dei biomorfi, ma lo spazio genetico reale. Gli animali reali che sono vissuti sulla Terra sono un minuscolo sottoinsieme degli animali teorici che sarebbero potuti esistere. Tali animali reali sono i prodotti di un numero molto piccolo di traiettorie evolutive attraverso lo spazio genetico. La grande maggioranza delle traiettorie teoriche attraverso lo spazio animale dà origine a mostri impossibili. Gli animali reali sono sparsi qua e là fra i mostri ipotetici, appollaiati ciascuno nel suo posto unico nell'iperspazio genetico. Ogni animale reale è circondato da un piccolo gruppo di vicini, la maggior parte dei quali non sono mai esistiti, ma alcuni dei quali sono i suoi progenitori, i suoi discendenti e i suoi cugini.

Situati da qualche parte in questo immenso spazio matematico sono esseri umani e iene, amebe e oritteropi, plattelminti e seppie, dronti e dinosauri. In teoria, se noi fossimo abbastanza bravi nell'ingegneria genetica, potremmo passare da qualsiasi punto nello spazio animale a qualsiasi altro punto. Prendendo l'avvio da un punto di partenza arbitrariamente scelto, potremmo percorrere questo labirinto in modo da ricostruire il dronte, il tirannosauro e le trilobiti. Basterebbe che sapessimo su quali geni intervenire, quali pezzetti di cromosoma duplicare, invertire o cancellare.

Dubito che avremo mai una conoscenza sufficiente a realizzare un tale obiettivo, ma queste care creature defunte sono appiattate qui, per sempre, nei loro cantucci privati di quell'immenso ipervolume genetico, in attesa di essere trovate se mai avremo le conoscenze necessarie per percorrere la giusta via lungo il labirinto. Noi potremmo addirittura essere in grado di far evolvere una ricostruzione esatta di un dronte incrociando selettivamente dei piccioni, anche se dovremmo vivere un milione di anni per portare a termine questo esperimento.

Ma se ci viene impedito di compiere un viaggio nella realtà, l'immaginazione non è un cattivo sostituto. Per chi, come me, non è un matematico, il computer può essere di grande ausilio all'immaginazione. Come la matematica, esso non solo espande l'immaginazione, ma la sottopone anche a un'azione di disciplina e di controllo.

IV

Scorribande attraverso il mondo animale

Come abbiamo visto nel capitolo II, molte persone trovano difficile credere che qualcosa di simile all'occhio, l'esempio preferito di Paley, un organo così complesso e così ben progettato, con un numero tanto grande di parti interconnesse, possa avere avuto origine da piccoli inizi per mezzo di una serie di mutamenti gradualmente, un passo dopo l'altro. Torniamo ora a considerare il problema alla luce di nuove intuizioni, come quelle che possono esserci state fornite dai biomorfi. Rispondiamo alle due domande seguenti:

1. L'occhio umano potrebbe avere avuto origine direttamente, senza derivare da una qualche altra forma di occhio, in un passo singolo?
2. L'occhio umano potrebbe essere derivato direttamente da qualcosa di leggermente diverso da se stesso, qualcosa che possiamo chiamare X?

La risposta alla domanda 1 è chiaramente un «no» deciso. Le probabilità contrarie a una risposta positiva per domande come la 1 sono di molti miliardi di volte maggiori del numero degli atomi nell'universo. Una risposta positiva richiederebbe un salto così gigantesco e così improbabile attraverso l'iperspazio genetico da tendere all'impossibilità. La risposta alla domanda 2 è altrettanto chiaramente «sì», purché la differenza fra l'occhio moderno e il suo predecessore immediato X sia abbastanza piccola. Purché, in altri termini, essi siano sufficientemente vicini l'uno all'altro nello spazio di tutte le strutture possibili. Se la risposta alla domanda 2 per ogni particolare grado di differenza è no, tutto ciò che dobbiamo fare è ripetere la domanda per un grado di differenza minore, proseguendo fino a trovare un grado di differenza abbastanza piccolo da permetterci di rispondere «sì».

X è definito come qualcosa di molto simile a un occhio umano, di abbastanza simile perché un occhio umano possa esserne concepibilmente derivato per mezzo di una singola alterazione.

Se il lettore ha una certa immagine mentale di X e non ritiene plausibile che l'occhio umano possa esserne derivato direttamente, ciò significa semplicemente che ha scelto un X sbagliato. Egli dovrà allora rendere l'immagine di X progressivamente più simile a un occhio umano fino a trovare un X che gli sembri plausibile come predecessore immediato dell'occhio umano. Ci dev'essere un X plausibile anche per il lettore, anche se la sua idea di ciò che è plausibile può essere più o meno prudente della mia!

Ora, avendo trovato un X tale che la risposta alla domanda 2 possa essere sì, applichiamo la stessa domanda a X stesso. Con lo stesso ragionamento dobbiamo concludere che X potrebbe essere derivato plausibilmente, per mezzo di un singolo mutamento, da qualcosa di leggermente diverso che possiamo chiamare X'. È chiaro che potremmo poi ricondurre X' a qualcos'altro di lievemente diverso, X'', e via dicendo. Ripetendo questo procedimento un numero sufficiente di volte, possiamo derivare l'occhio umano da qualcosa non leggermente diverso da sé bensì molto diverso da sé. Noi possiamo «percorrere» una grande distanza attraverso lo «spazio animale» e il nostro percorso sarà plausibile purché possa essere compiuto a passi abbastanza piccoli. A questo punto siamo in grado di rispondere a una terza domanda.

3. Esiste una serie continua di X che connettono l'occhio umano moderno a una condizione del tutto priva di occhi?

Mi pare chiaro che la risposta non possa essere altro che sì, purché concediamo a noi stessi una serie di X sufficientemente grande. Il lettore potrebbe pensare che 1000 X sia un numero abbastanza grande, ma se, per rendere la transizione totale plausibile nella propria mente, si ha bisogno di un numero maggiore di passi, è sufficiente ipotizzare 10.000 X in luogo di 1000, o addirittura 100.000 in luogo di 10.000, e via dicendo. È chiaro che il tempo disponibile impone un limite massimo a questo gioco, potendoci essere un solo X per generazione. In pratica la domanda si risolve perciò nell'interrogativo seguente: c'è stato abbastanza tempo per un numero sufficiente di generazioni successive? Noi non siamo in grado di dare una risposta precisa al numero di generazioni che sarebbero necessarie.

Quel che sappiamo è che il tempo geologico è spaventosamente lungo. Solo per dare al lettore un'idea dell'ordine di grandezza di cui stiamo parlando, il numero di generazioni che ci separano dai nostri progenitori più antichi si misura certamente in miliardi di anni. Dati, per esempio, cento milioni di X, dovremmo essere in grado di costruire una serie plausibile di minuscole gradazioni che connettano un occhio umano praticamente a qualsiasi altra cosa!

Finora, per mezzo di un processo di ragionamento più o meno astratto, abbiamo concluso che esiste una serie di X immaginabili, ciascuno dei quali abbastanza simile ai suoi vicini da potersi plausibilmente trasformare in uno di essi, e che l'intera serie collega l'occhio umano con qualcosa che non è neppure un occhio. Ma non abbiamo ancora dimostrato che è plausibile che questa serie di X sia realmente esistita. Abbiamo altre due domande a cui rispondere.

4. Considerando ciascun membro della serie di ipotetici X che connettono l'occhio umano a qualcosa che non era ancora un occhio, è plausibile che ognuno di essi sia stato reso disponibile da una mutazione casuale del suo predecessore?

Questa è in realtà una domanda sull'embriologia, non sulla genetica; ed è una domanda del tutto

distinta rispetto a quella che creava motivo di preoccupazione al vescovo di Birmingham e ad altri. La mutazione deve lavorare modificando i processi esistenti di sviluppo embrionale. Si può sostenere che certi tipi di processo embrionale siano altamente suscettibili di variare in certe direzioni e recalcitranti alla variazione in altre. Tornerò su questo punto nel capitolo XI cosicché qui mi limiterò a sottolineare di nuovo la differenza fra mutamenti piccoli e grandi.

Quanto più piccolo è il mutamento che postuliamo, tanto minore è la differenza fra X'' e X' , e tanto più plausibile embriologicamente è la mutazione in oggetto. Nel capitolo precedente abbiamo visto, sulla base di ragioni puramente statistiche, che una qualsiasi grande mutazione particolare è intrinsecamente meno probabile di una qualsiasi piccola mutazione particolare. Quali che siano i problemi che possono essere sollevati dalla domanda 4, quindi, possiamo almeno renderci conto che quanto più piccola rendiamo la differenza fra ogni X' e ogni X'' dato, tanto più piccoli diventeranno i problemi. Io penso che, purché la differenza fra forme intermedie vicine nella nostra serie che conduce all'occhio sia sufficientemente piccola, le mutazioni necessarie risulteranno quasi inevitabili. Dopo tutto, stiamo parlando sempre di mutamenti quantitativi minori in un processo embrionale esistente. Ricordiamo che, per quanto complicato possa essere lo status quo embriologico in ogni generazione data, ogni mutamento dovuto a mutazioni nello status quo può essere molto piccolo e semplice.

Abbiamo un'ultima domanda a cui rispondere: 5. Considerando ciascun membro della serie di ipotetici X che connettono l'occhio umano a qualcosa che non era ancora un occhio, è plausibile che ciascuno di essi abbia funzionato abbastanza bene da contribuire alla sopravvivenza e alla riproduzione degli animali interessati?

Fatto piuttosto strano, alcune persone hanno pensato che la risposta a questa domanda sia un «no» evidente. Come esempio citerò un brano del libro del 1982 di Francis Hitching, *The Neck of the Giraffe, or Where Darwin Went Wrong*. Avrei potuto citare fondamentalmente le stesse parole da una qualsiasi pubblicazione dei Testimoni di Geova, ma ho scelto questo libro perché una casa editrice rispettabile (la Pan Books) ha ritenuto opportuno pubblicarlo, nonostante un numero grandissimo di errori che si sarebbero potuti facilmente evitare se si fosse dato in lettura il manoscritto a un diplomato in biologia disoccupato, o anche a un semplice studente. (Gli errori che mi hanno divertito di più, se mi si concedono solo un paio di battute per iniziati, sono il conferimento del cavalierato al professor John Maynard Smith e la descrizione del professor Ernst Mayr, l'eloquente arcicritico della genetica matematica - la persona più aliena dalla matematica che si possa immaginare - come «il sommo sacerdote» della genetica matematica.)

Perché l'occhio funzioni devono verificarsi i seguenti passi minimi perfettamente coordinati (ce ne sono molti altri che hanno luogo simultaneamente, ma persino una descrizione grossolanamente semplificata è sufficiente a evidenziare i problemi che si pongono alla teoria di Darwin). L'occhio dev'essere pulito e umido, mantenuto in questo stato dall'interazione fra la ghiandola lacrimale e palpebre mobili, le cui ciglia fungono anche da rozzo filtro contro il sole. La luce passa quindi attraverso una piccola sezione trasparente del rivestimento protettivo esterno (la cornea) e prosegue attraverso una lente, il cristallino, che la concentra sulla parte posteriore della retina. Qui 130 milioni di bastoncelli e coni sensibili alla luce causano reazioni fotochimiche che trasformano la luce in impulsi elettrici. Circa un miliardo di impulsi elettrici vengono trasmessi ogni secondo, per mezzo di un meccanismo che non è compreso perfettamente, a un cervello che intraprende poi un'azione appropriata.

Ora, è del tutto chiaro che se si produce un inconveniente anche minimo en route - se la cornea non è perfettamente trasparente, o la pupilla non riesce a dilatarsi, o il cristallino si opacizza, o la messa a fuoco non funziona - non si forma un'immagine riconoscibile. L'occhio o funziona nella sua totalità o non funziona affatto. Com'è dunque possibile che esso sia pervenuto a evolversi per mezzo di miglioramenti darwiniani lenti, costanti, di una piccolezza infinitesimale? È davvero plausibile che migliaia e migliaia di mutazioni casuali fortunate si siano verificate per coincidenza, così che il cristallino e la retina, che non possono lavorare l'uno senza l'altra, si siano evoluti in sincronia?

Quale valore di sopravvivenza potrebbe esserci in un occhio che non vede?

Questo ragionamento degno di nota viene riproposto spesso, presumibilmente perché le persone

desiderano credere nella sua conclusione. Consideriamo l'affermazione che «se si produce un inconveniente anche minimo [...] se [...] la messa a fuoco non funziona [...] non si forma un'immagine riconoscibile». C'è una probabilità non lontana dal 50 per cento che tu stia leggendo queste parole con gli occhiali. Togliti gli occhiali e guardati in giro. Sei d'accordo che «non si forma un'immagine riconoscibile»? Se sei maschio, c'è una probabilità di 1 a 12 che tu soffra di una forma di acromatopsia o cecità ai colori. Potresti essere astigmatico. Non è improbabile che, senza occhiali, la tua vista sia confusa e annebbiata. Uno dei teorici dell'evoluzione più famosi di oggi (anche se non ha ancora ricevuto il cavalierato) si pulisce così di rado le lenti che è improbabile che esca mai da una tale confusione nebulosa, ma pare comunque che se la cavi abbastanza bene e, a quanto dice egli stesso, era abituato a praticare lo squash con un solo occhio. Se tu perdessi i tuoi occhiali forse potresti scombussolare i tuoi amici non riconoscendoli per strada, ma tu stesso resteresti senza dubbio ancora più sconvolto se qualcuno ti dicesse: «Dal momento che la tua vista non è assolutamente perfetta, potresti andare in giro a occhi chiusi finché non ritrovi i tuoi occhiali». Eppure questo è essenzialmente ciò che sta suggerendo l'autore del passo che ho appena citato.

Egli afferma anche, come se fosse una cosa ovvia, che il cristallino e la retina non possono lavorare l'uno senza l'altra. Sulla base di quale autorità? Una donna che conosco bene è stata operata di cataratta a entrambi gli occhi. Essa non ha più il cristallino in nessuno dei due occhi. Senza occhiali non potrebbe neppure cominciare a giocare a tennis o puntare un fucile. Essa mi assicura però che riesce a cavarsela molto meglio con gli occhi privi di cristallino che senza occhi. Senza cristallino ci si rende conto se si sta per sbattere contro un muro o contro un'altra persona. Un animale selvatico privo di cristallino sarebbe ancora in grado di usare i propri occhi per percepire la figura incombente di un predatore e la direzione da cui esso sta avvicinandosi. In un mondo primitivo popolato da creature prive di occhi e da altre con occhi senza cristallino, quelle con occhi senza cristallino avrebbero avuto ogni sorta di vantaggi. C'è inoltre una serie continua di X tale che ogni piccolo miglioramento nella definizione dell'immagine, da una confusione nebulosa alla visione umana perfetta, aumenta plausibilmente le probabilità di sopravvivenza dell'organismo.

Il libro prosegue citando una frase di Stephen Jay Gould, il famoso paleontologo di Harvard: Noi evitiamo la domanda eccellente: «A che cosa serve il 5 per cento di un occhio?» sostenendo che il possessore di una tale struttura incipiente non la usava per la vista.

Un antico animale in possesso del 5 per cento di un occhio avrebbe potuto usarlo in effetti per qualcosa di diverso dalla vista, ma appare almeno altrettanto probabile che lo usasse per avere una vista al 5 per cento. E in realtà non penso che questa sia una domanda eccellente. Una vista che è pari al 5 per cento della tua o della mia è senza dubbio molto preferibile all'essere del tutto senza vista. Così una vista all'un per cento è preferibile alla totale cecità. E il 6 per cento è meglio del 5 per cento, il 7 per cento è meglio del 6 per cento, e così via salendo su per la serie graduale continua.

Questa sorta di problema ha dato del filo da torcere ad alcuni scienziati interessati al «mimetismo» come difesa nei confronti di predatori. Gli insetti-stecco sono molto simili a stecchi e grazie a questo accorgimento evitano di essere mangiati dagli uccelli. Gli insetti-fogliasecca assomigliano a foglie. Molte specie commestibili di farfalle si procurano una forma di protezione assomigliando a specie dannose o velenose. Queste somiglianze sono molto più impressionanti della somiglianza di nubi a donnole. In molti casi sono addirittura più impressionanti della somiglianza di «miei» insetti a insetti reali. Gli insetti reali, dopo tutto, hanno sei zampe, non otto! La selezione naturale reale ha avuto a disposizione un numero di generazioni almeno un milione di volte maggiore di quelle di cui ho potuto disporre io, nelle quali perfezionare tale somiglianza.

Per questi casi usiamo la parola «mimetismo» non perché pensiamo che gli animali imitino coscientemente altre cose ma perché la selezione naturale ha favorito gli individui il cui corpo si prestava a essere scambiato per altre cose. Per esprimerci in un altro modo, i progenitori degli insetti-stecco che non assomigliavano a stecchi non lasciarono discendenti. Il genetista tedesco-americano Richard Goldschmidt è il più eminente fra coloro che hanno sostenuto che l'evoluzione iniziale di tali somiglianze non potrebbe essere stata favorita dalla selezione naturale. Come Gould,

che è un ammiratore di Goldschmidt, disse degli insetti che imitano il letame: «Può esserci qualche vantaggio nell'assomigliare per il 5 per cento a un pezzo di sterco?». In gran parte per influenza di Gould, è invalso recentemente l'uso di dire che Goldschmidt fu sottovalutato mentre era in vita, e che in realtà ha molto da insegnarci. Ecco un esempio del suo modo di ragionare: Ford parla [...] di mutazioni che potrebbero conferire una «remota somiglianza» a una specie più protetta, somiglianza dalla quale potrebbe derivare qualche vantaggio, per quanto lieve. Noi dobbiamo chiederci quanto possa essere remota tale somiglianza per avere un valore selettivo. Possiamo veramente supporre che gli uccelli e le scimmie e anche le mantidi siano osservatori così mirabili (o che lo siano alcuni individui particolarmente abili fra loro) da notare una «remota» somiglianza e da lasciarsene dissuadere? Io penso che questo sia chiedere troppo.

Un tale amaro sarcasmo colpisce chiunque si trovi a muoversi su un suolo così malfermo come quello qui calcato da Goldschmidt. Mirabili osservatori? Individui particolarmente abili? Qualcuno potrebbe forse pensare che uccelli e scimmie abbiano tratto beneficio dal fatto di essere stati ingannati da tale remota somiglianza? Goldschmidt avrebbe potuto dire piuttosto: «Possiamo supporre realmente che gli uccelli ecc. siano osservatori così modesti (o che lo siano alcuni individui particolarmente stupidi fra loro)?». Nondimeno, qui ci troviamo di fronte a un vero dilemma. La somiglianza iniziale dell'insetto-stecco ancestrale con uno stecco dev'essere stata molto remota. Un uccello doveva avere una vista estremamente mediocre per lasciarsene ingannare. Eppure la somiglianza di un insetto-stecco moderno a uno stecco è meravigliosamente buona, fino ai particolari più fini delle false gemme e delle false cicatrici fogliari. Gli uccelli, alla cui evoluzione diede l'ultimo tocco la predazione selettiva, devono avere avuto, almeno nel loro complesso, una vista eccellente. Essi devono essere stati estremamente difficili da ingannare, giacché in caso contrario gli insetti non avrebbero evoluto forme di mimetismo così perfette, ma avrebbero conseguito risultati di minore eccellenza. Come possiamo risolvere quest'apparente contraddizione?

Un tipo di risposta suggerisce che la vista degli uccelli sia migliorata parallelamente al mimetismo degli insetti. Forse, per fare una battuta di spirito, si potrebbe dire che un insetto ancestrale che assomigliava solo per il 5 per cento a un pezzo di sterco avrebbe potuto trarre in inganno un uccello che aveva una vista solo del 5 per cento. Questo non è però il tipo di risposta che io vorrei dare. Sospetto in effetti che l'intero processo dell'evoluzione, a partire da una somiglianza remota sino a giungere a un mimetismo quasi perfetto, si sia realizzato, piuttosto rapidamente, molte volte in diversi gruppi di insetti, durante l'intero lungo periodo in cui la vista degli uccelli è stata pressa poco così buona com'è oggi.

Un altro tipo di risposta che è stato dato a questo dilemma è il seguente. Forse ogni specie di uccello o di scimmia ha una vista mediocre e riesce a cogliere solo un aspetto limitato di un insetto. Forse una specie di predatori rileva solo il colore, un'altra solo la forma, un'altra solo le caratteristiche della superficie e via dicendo. In tal caso un insetto che assomigli a uno stecco solo sotto un aspetto limitato ingannerà un tipo di predatore, anche se sarà mangiato da tutti gli altri tipi. Al progredire dell'evoluzione andranno ad aggiungersi al repertorio degli insetti un numero sempre maggiore di caratteri di somiglianza. La perfezione finale, dalle molte sfaccettature, del mimetismo è stata conseguita in virtù della selezione naturale complessiva operata da molte specie diverse di predatori. Nessun predatore vede l'intera perfezione del mimetismo, che solo noi riusciamo a cogliere.

Questo fatto sembrerebbe implicare che soltanto noi siamo abbastanza «abili» da vedere il mimetismo in tutta la sua gloria.

Non solo per rifiuto dello snobismo umano di questo punto di vista, io preferisco però una spiegazione ancora diversa, ossia che, per quanto la vista di un predatore possa essere buona in certe condizioni, essa può essere estremamente cattiva in altre.

In effetti, sulla base della nostra stessa esperienza personale, noi siamo in grado di apprezzare facilmente l'intero ambito di variazione che va da una vista molto imperfetta a una vista eccellente. Se guardo direttamente un insetto-stecco che si trova a una ventina di centimetri dai miei occhi e che è esposto alla intensa luce del giorno, non me ne lascerò ingannare. Noterò le lunghe zampe che

costeggiano la linea del torace e dell'addome. Può accadermi di rilevare la presenza innaturale della simmetria, che uno stecco vero non avrebbe. Se però, con gli stessi occhi e lo stesso cervello, cammino attraverso una foresta al crepuscolo, posso benissimo lasciarmi sfuggire quasi tutti gli insetti di colore scuro sospesi ai numerosi rami e ramoscelli. L'immagine dell'insetto potrebbe venire proiettata alla periferia della retina, anziché nella parte centrale, più acuta. La luce potrebbe essere comunque così scarsa da impedirmi la percezione di qualsiasi cosa.

In effetti, per quanto remota, per quanto povera possa essere la somiglianza di un insetto a uno stecco, dev'esserci un qualche livello di semioscurità, o un qualche grado di distanza dall'occhio, o una qualche misura di distrazione dell'attenzione del predatore tale che persino un occhio molto buono possa essere ingannato da quella vaga somiglianza. Se il lettore non trova plausibile questa spiegazione per qualche particolare esempio che potrebbe avere immaginato, dovrebbe solo attenuare un po' la sua luce immaginaria, o allontanarsi un po' di più dall'oggetto immaginario! Il punto è che più di un insetto fu salvato da una somiglianza per quanto vaga a un ramoscello o a una foglia o a un pezzo di sterco, o per il fatto che un predatore guardò nella sua direzione al crepuscolo, o attraverso la nebbia, o distratto da una femmina ricettiva. E più di un insetto si salvò, forse proprio dallo stesso predatore - in occasioni in cui questi si trovò a guardarlo a una distanza relativamente piccola e in buona luce - grazie a una somiglianza sorprendentemente buona con un ramoscello. La cosa importante, a proposito dell'intensità della luce, della distanza dell'insetto dal predatore, della distanza dell'immagine dal centro della retina e di variabili simili, è che esse sono tutte variabili continue. Esse variano per gradi insensibili dall'estremo dell'invisibilità all'estremo della visibilità. Tali variabili continue promuovono un'evoluzione continua e graduale.

Il problema di Richard Goldschmidt - che fu uno di una serie di problemi che lo convinsero a adottare, per la maggior parte della sua vita professionale, la convinzione estrema che l'evoluzione proceda a grandi balzi piuttosto che a piccoli passi - risulta non essere affatto un problema. E, incidentalmente, noi abbiamo dimostrato ancora una volta a noi stessi che una vista del 5 per cento è meglio dell'assenza di vista. La qualità della mia vista alla periferia della retina è probabilmente ancor meno del 5 per cento della qualità al centro della mia retina, se proprio vogliamo dare una valutazione quantitativa della qualità. Eppure, guardando con la coda dell'occhio, io riesco ancora a percepire la presenza di un grande autocarro o di un autobus. Poiché ogni giorno vado a lavorare in bicicletta, qualche volta questo fatto mi ha probabilmente salvato la vita. Io mi accorgo della differenza nei giorni in cui piove e porto un cappello. La qualità della nostra visione in una notte buia dev'essere molto inferiore al 5 per cento di quella che è a mezzogiorno. Eppure più di un nostro progenitore fu salvato probabilmente dall'aver visto qualcosa di realmente importante, come per esempio una tigre dalle zanne a sciabola, o un precipizio, nel cuore della notte.

Ognuno di noi sa per esperienza personale, conseguita per esempio in notti buie, che esiste una serie continua, graduata per sfumature insensibili, dalla totale cecità alla visione perfetta e che ogni passo avanti lungo questa serie conferisce benefici sensibili. Se guardiamo il mondo attraverso un binocolo la cui regolazione della messa a fuoco venga variata in modo continuo, possiamo convincerci rapidamente che esiste una serie graduata nella qualità della messa a fuoco e che ogni gradino in questa serie corrisponde a un miglioramento rispetto al gradino precedente. Azionando progressivamente il comando del colore di un televisore, non abbiamo difficoltà a convincerci che esista una serie graduale di miglioramento progressivo dal bianco e nero alla visione a colori. Il diaframma dell'iride che fa aprire e chiudere la pupilla ci permette di non farci abbagliare dalla luce brillante, e al tempo stesso ci consente anche di vedere in condizioni di scarsa luce. Noi tutti sperimentiamo che cosa significhi non avere un diaframma dell'iride quando siamo temporaneamente abbagliati, di notte, dai fari di una macchina che incrociamo. Per quanto sgradevole, e pericoloso, possa essere questo abbagliamento, esso non significa nondimeno che l'intero occhio abbia smesso di funzionare! L'affermazione che «l'occhio o funziona nella sua totalità o non funziona affatto» risulta essere non solo falsa ma anche chiaramente falsa a chiunque rifletta per due secondi sulla sua esperienza quotidiana.

Torniamo ora alla domanda 5. Considerando ciascun membro della serie di X che connettono l'occhio umano a qualcosa che non era affatto un occhio, è plausibile che ognuno di essi funzionasse

abbastanza bene da contribuire alla sopravvivenza e alla riproduzione degli animali che lo possedevano? Abbiamo visto la stupidità dell'assunto antievoluzionistico che la risposta sia un chiaro no. Ma la risposta è sì? Benché la cosa non sia tanto ovvia, io ritengo che sia così. Non solo è chiaro che avere parte di un occhio sia meglio che non avere affatto occhi, ma troviamo anche una serie plausibile di strutture intermedie fra gli animali moderni. Ciò non significa, ovviamente, che queste strutture moderne rappresentino realmente dei tipi ancestrali, ma dimostra che forme intermedie sono capaci di funzionare.

Alcuni animali unicellulari hanno una macchia sensibile alla luce con un piccolo schermo di pigmento dietro di essa. Lo schermo protegge la macchia dalla luce proveniente da una certa direzione, fornendo così all'animale un'indicazione sulla direzione da cui viene la luce. Fra gli animali pluricellulari, vari tipi di vermi e qualche mollusco presentano una soluzione simile, con la differenza però che le cellule sensibili alla luce sono contenute in una invaginazione epiteliale o fossetta. Questo fatto fornisce una migliore capacità di individuare la direzione, poiché ogni cellula è protetta selettivamente dai raggi di luce che entrano nella fossetta dalla sua parte. In una serie continua che va da strati piani di cellule fotosensibili a fossette poco profonde, ogni passo nella serie, per quanto piccolo (o grande), sarebbe un perfezionamento ottico. Ora, nel caso di una fossetta molto profonda, i cui lati siano rivoltati in modo da ottenere una chiusura progressivamente più completa, si ottiene infine una camera stenopeica, ossia una camera oscura senza lente in cui la luce entra attraverso un forellino grande quanto la punta di uno spillo. Esiste una serie di gradazioni continue da una fossetta poco profonda a una camera stenopeica (vedi, per un esempio, le prime sette generazioni della serie evolutiva nella figura 4).

Una camera stenopeica forma un'immagine definita, la quale è tanto più nitida (ma anche meno luminosa) quanto più piccolo è il forellino, e tanto più luminosa (ma confusa) quanto più il foro è grande. Il nautilo, un mollusco capace di nuotare - strana creatura di aspetto simile ai calamari che vive in una conchiglia, come le ammoniti oggi estinte (vedi il «cefalopodo con conchiglia» della figura 5) -, ha per occhi un paio di camere stenopeiche. L'occhio ha fondamentalmente la stessa forma del nostro, ma è privo di lente e la pupilla è solo un foro che lascia entrare l'acqua di mare nella cavità interna dell'occhio. In realtà il nautilo rappresenta un vero enigma. Perché, in tutte le centinaia di milioni di anni a partire da quando i suoi progenitori svilupparono per la prima volta una camera oscura senza lente, esso non scoprì mai il principio della lente? Il vantaggio di una lente è quello di consentire all'immagine di essere nitida e luminosa al tempo stesso. Quel che nel nautilo dà da pensare è il fatto che la qualità della sua retina è tale che esso potrebbe trarre davvero un beneficio grandissimo e immediato da una lente. Questo mollusco è come un sistema di alta fedeltà con un eccellente amplificatore ma con un grammofono dalla puntina consumata. Il sistema sembrerebbe esigere a gran voce un mutamento particolare semplice. Nell'iperspazio genetico il nautilo sembra trovarsi immediatamente accanto a un miglioramento ovvio e immediato, eppure non compie questo piccolo passo necessario. Perché no? Michael Land dell'Università del Sussex, la più grande autorità nel Regno Unito sugli occhi degli invertebrati, non riesce a darsi ragione di questo fatto, e neppure io. Forse le mutazioni necessarie non possono verificarsi dato il modo in cui si sviluppano gli embrioni del nautilo?

Questa spiegazione non mi soddisfa, ma non ho una spiegazione migliore da offrire. Almeno il nautilo dimostra in modo efficace che un occhio senza lente è una soluzione di gran lunga preferibile all'assenza di occhi.

Quando si ha per occhio una fossetta quasi chiusa, una vescicola, la sovrapposizione alla sua apertura di un qualsiasi materiale vagamente convesso, vagamente trasparente o addirittura semitrasparente costituirà un miglioramento potendo esso fungere da lente, per quanto modesta. La lente raccoglie luce al di sopra della sua superficie e la concentra su un'area più ristretta della retina. Una volta realizzato un tale rozzo protocristallino, si verifica una serie di perfezionamenti graduata in modo continuo che lo ispessiscono, ne aumentano la trasparenza e ne riducono la distorsione, tendenza che culmina in quella che noi tutti riconosciamo come una vera lente, il cristallino. I parenti del nautilo, i calamari e i polpi, posseggono una vera lente, molto simile alla nostra, benché i loro progenitori abbiano senza dubbio evoluto l'intero principio dell'occhio a camera stenopeica in

modo completamente indipendente da noi. Per inciso, Michael Land calcola che esistano nove principi fondamentali per la formazione di immagini per mezzo di occhi, e che la maggior parte di essi siano stati evoluti molte volte autonomamente. Per esempio il principio del disco riflettore incurvato è radicalmente diverso dal nostro occhio a camera oscura (noi lo usiamo nei radiotelescopi, e anche nei nostri telescopi ottici di maggiori dimensioni poiché è più facile costruire un grande specchio che non una grande lente), ed è stato «inventato» indipendentemente da vari molluschi e crostacei. Altri crostacei hanno un occhio composto come gli insetti (in realtà una grande aggregazione di minuscoli occhi), mentre altri molluschi, come abbiamo visto, hanno un occhio a camera stenopeica dotato di lente come il nostro, oppure un occhio a camera stenopeica senza lente. Per ciascuno di questi tipi di occhio esistono in altri animali moderni stadi corrispondenti a forme evolutive intermedie perfettamente funzionanti.

La letteratura di propaganda contro l'evoluzione abbonda di presunti esempi di sistemi complessi che «non potrebbero» essere passati attraverso una serie graduale di forme intermedie.

Questo è spesso solo un altro caso dell'atteggiamento piuttosto patetico dell'«incredulità personale» in cui ci siamo imbattuti nel capitolo II. Subito dopo la sezione sull'occhio, per esempio, il libro *The Neck of the Giraffe* di Hitching continua discutendo il caso del brachino bombardiere, un coleottero che schizza in faccia ai suoi nemici un miscuglio letale di idrochinone e di acqua ossigenata. Queste due sostanze chimiche, quando vengono mescolate assieme, esplodono letteralmente. Per poterle conservare senza danno dentro il suo corpo, il brachino bombardiere ha sviluppato perciò un inibitore chimico che le rende innocue. Nel momento in cui il coleottero spruzza il liquido dalla parte posteriore del suo addome, al miscuglio viene aggiunto un anti-inibitore per renderlo di nuovo esplosivo. La catena di eventi che hanno potuto condurre a un processo così complesso, coordinato e sottile sfida qualsiasi spiegazione biologica sulla base di una sequenza di passi semplici. La minima alterazione nell'equilibrio chimico condurrebbe immediatamente a una strage di massa di brachini bombardieri suicidi.

Un mio collega biochimico mi ha fornito gentilmente una bottiglia d'acqua ossigenata e abbastanza idrochinone per 50 brachini bombardieri. Ora mi accingo a mescolare assieme le due sostanze.

Secondo le affermazioni di Hitching, esse mi esploderanno in faccia. Vediamo...

Be', sono ancora qui. Ho versato l'acqua ossigenata nell'idrochinone, e non è accaduto assolutamente nulla. La miscela non si è neppure riscaldata. Ovviamente lo sapevo: non sono poi tanto temerario! L'affermazione che «queste due sostanze chimiche, quando vengono mescolate assieme, esplodono letteralmente» è semplicemente falsa, anche se viene ripetuta regolarmente nella letteratura creazionistica. Se il lettore è curioso di sapere che cosa accada realmente nel brachino bombardiere, eccolo accontentato. È vero che il brachino schizza sui suoi nemici un miscuglio caldissimo di acqua ossigenata e di idrochinone, ma le due sostanze non reagiscono violentemente fra loro a meno che non si aggiunga un catalizzatore. E questo è appunto ciò che fa il brachino bombardiere. Quanto ai precursori di questo sistema nell'evoluzione, sia l'acqua ossigenata sia vari tipi di chinoni sono usati per altri scopi nella chimica del corpo. I progenitori del brachino bombardiere usarono semplicemente a un fine diverso delle sostanze di cui già disponevano. È questo il modo in cui spesso funziona l'evoluzione.

Nella stessa pagina del libro di Hitching in cui si tratta del brachino bombardiere c'è la domanda: «Di quale utilità sarebbe [...] mezzo polmone? La selezione naturale eliminerebbe senza dubbio creature così strane, non le conserverebbe». In un essere umano adulto sano, ognuno dei due polmoni è diviso in circa trecento milioni di minuscole camere, gli alveoli, alle punte di un sistema ramificato di condotti. L'architettura di questi condotti - i bronchi, i bronchioli e i condotti alveolari - assomiglia all'albero biomorfo nella figura 2 in basso, nel capitolo precedente. In quell'albero il numero delle successive ramificazioni, determinate dal «gene 9», è otto, e il numero delle punte di ramoscelli è 2 elevato all'ottava potenza, cioè 256. Man mano che, nella figura 2, si scende verso il basso, in ogni albero il numero delle punte dei ramoscelli si raddoppia. Per arrivare al numero di 300 milioni di punte di ramoscelli si richiederebbero solo 29 raddoppiamenti successivi. Si noti che qui c'è una gradazione continua da un singolo alveolo a 300 milioni di alveoli, ogni passo in questa gradazione essendo fornito da un'altra ramificazione in due. Questa transizione può essere compiuta

in 29 ramificazioni successive, cosa che possiamo immaginarci nel modo più semplice come una solenne passeggiata di 29 passi attraverso lo spazio genetico.

Nei polmoni, il risultato di tutta questa ramificazione è che l'area della superficie funzionale all'interno di ciascun polmone è di circa 60 metri quadrati. L'area è la variabile importante per un polmone, determinando la rapidità con cui può essere assunto l'ossigeno, ed espulsa l'anidride carbonica, che è il prodotto di rifiuto. Ora, la cosa importante sull'area è che essa è una variabile continua. L'area non è una di quelle cose che si hanno o non si hanno. È una cosa che si può avere in quantità maggiore o minore. Più della maggior parte delle altre cose, l'area dei polmoni si presta a un mutamento graduale, un passo dopo l'altro, a partire da 0 metri quadrati sino a 60 metri quadrati. Ci sono numerosi pazienti chirurgici che se ne vanno in giro con un solo polmone, e alcuni di loro dispongono solo di un terzo dell'area polmonare normale. Essi possono camminare, ma non fanno molta strada e non camminano con passo molto svelto. Questo è il punto. Una riduzione graduale dell'area dei polmoni non ha un effetto assoluto, del tipo tutto o nulla, sulla sopravvivenza. Ha invece un effetto graduale, esercitando una variazione continua su quanto un individuo riesce a camminare, e quanto velocemente. Variazione che si riflette, in modo altrettanto continuo, sulla speranza di vita dell'individuo. La morte non arriva bruscamente al di sotto di un particolare valore di soglia della superficie dei polmoni! Essa diventa gradualmente più probabile man mano che l'area dei polmoni diminuisce al di sotto di un optimum (e man mano che cresce al di sopra di quello stesso optimum, per ragioni diverse connesse al dispendio di energia).

I primi fra i nostri progenitori a sviluppare polmoni vissero quasi certamente nell'acqua. Possiamo farci un'idea di come probabilmente respiravano osservando i pesci moderni. La maggior parte dei pesci moderni respirano in acqua con le branchie, ma molte specie che vivono in acquitrini, poveri di ossigeno, integrano la respirazione branchiale inghiottendo aria in superficie. Essi usano come una sorta di rozzo protopolmone la camera interna della bocca, la quale è talvolta ingrandita in un sacco respiratorio riccamente vascolarizzato. Come abbiamo visto, non c'è alcuna difficoltà nell'immaginare una serie continua di forme intermedie che connettano un singolo sacco respiratorio a un insieme ramificato di 300 milioni di alveoli, come in un polmone umano moderno. Fatto interessante, molti pesci moderni hanno conservato il loro singolo sacco e lo usano per uno scopo completamente diverso. Pur avendo avuto probabilmente in origine una funzione respiratoria, esso si è trasformato nel corso dell'evoluzione in una vescica natatoria o pneumatocisti, un dispositivo ingegnoso per mezzo del quale il pesce si mantiene in costante equilibrio idrostatico nell'acqua. Un animale privo di vescica natatoria è normalmente un po' più pesante dell'acqua, cosicché affonda.

Ecco perché gli squali devono nuotare di continuo per non affondare. Un animale che possieda al suo interno grandi sacche d'aria, come i nostri grandi polmoni, tende a salire in superficie. In una posizione intermedia in quest'ambito continuo di variazione, un animale con una vescica d'aria che abbia esattamente le dimensioni giuste non affonda né sale in superficie, ma si mantiene senza sforzo in equilibrio col mezzo ambiente.

È questo il dispositivo che è stato sviluppato dai pesci moderni con l'eccezione degli squali. A differenza di questi ultimi, essi non sprecano energia per evitare di affondare. Le loro pinne e la loro coda sono libere per la guida e la propulsione rapida. I pesci moderni non fanno più ricorso all'aria esterna per riempire la vescica natatoria, ma hanno sviluppato speciali ghiandole per la produzione di gas. Usando queste ghiandole e altri mezzi, essi regolano con precisione il volume del gas nella vescica, e riescono quindi a mantenersi in un preciso equilibrio idrostatico.

Varie specie di pesci moderni possono uscire dall'acqua. Un estremo è costituito dall'anabate indiano (*Anabas scandens*), un pesce che solo di rado entra in acqua. Esso ha sviluppato indipendentemente un tipo di polmone del tutto diverso da quello dei nostri antenati: una camera d'aria che circonda le branchie.

Altri pesci vivono per lo più in acqua, avventurandosi talvolta per breve tempo sulla terraferma. Questo fu probabilmente anche ciò che fecero i nostri antenati. Queste scorriere fuori dall'acqua possono presentare una variazione di durata continua, da zero in su. Se tu sei un pesce che vive e respira fondamentalmente in acqua, avventurandosi però occasionalmente sulla terraferma, per

esempio per passare da un acquitrino fangoso a un altro, sopravvivendo in tal modo a lunghi periodi di siccità, potresti trarre vantaggio non solo dal possesso di mezzo polmone ma anche di un centesimo di polmone. Per quanto piccolo sia il polmone primordiale, esso ti permetterà di sopravvivere per un po' di tempo fuori dell'acqua, tempo che dev'essere almeno un po' più lungo del tempo che riusciresti a sopravvivere senza tale polmone. Questa durata è una variabile continua. Non c'è una divisione netta fra animali che respirano nell'acqua e animali che respirano nell'aria. Animali diversi possono spendere in acqua il 99 per cento del loro tempo, o il 98 per cento, o il 97 per cento e così via sino allo 0 per cento. A ogni passo lungo questa via un qualsiasi aumento frazionario nell'aria dei polmoni rappresenterà un vantaggio. C'è continuità, gradualismo lungo l'intero ambito di variazione.

Quale utilità può avere mezza ala? In che modo le ali cominciarono a esistere? Molti animali saltano da un ramo all'altro, e a volte cadono al suolo. Specialmente in un animale di piccole dimensioni, l'intera superficie del corpo cattura l'aria e dà un aiuto nel salto, o interrompe la caduta, svolgendo l'azione di un rozzo piano a profilo aerodinamico. Ogni tendenza ad accrescere il rapporto della superficie al peso può offrire qualche vantaggio, per esempio membrane di pelle che crescessero negli angoli delle articolazioni. Da questo punto iniziale c'è una serie continua di gradazioni sino ad ali per il volo planato, e di qui alle ali battenti. È chiaro che ci sono distanze che non avrebbero potuto essere superate d'un balzo dai più antichi animali dotati di proto-ali. Fatto altrettanto ovvio, per ogni struttura alare, per quanto primitiva, dev'esserci una qualche distanza, per quanto breve, che può essere superata in un balzo grazie a tale superficie di sostentamento e che non può essere superata senza di essa.

Ora, se le prime superfici di sostentamento servivano per rallentare la caduta dell'animale, non si può dire che membrane alari di superficie inferiore a una superficie data non sarebbero state di alcuna utilità. Ancora una volta, non ha alcuna importanza se tali superfici di sostentamento erano piccole e molto diverse da vere ali. Dev'esserci una certa altezza, diciamo h , tale che un animale, cadendo da essa, si romperebbe l'osso del collo, mentre sopravviverebbe cadendo da un'altezza leggermente minore. In questa zona critica, qualsiasi perfezionamento della capacità della superficie del corpo di catturare aria e costringerla a sostenere il corpo diminuendo in tal modo la velocità di caduta, può fare la differenza fra la vita e la morte. La selezione naturale favorirà quindi gli animali in possesso di una superficie di sostentamento alare per quanto modesta. Una volta che questo prototipo di ala sia diventato la norma, l'altezza critica h diventerà leggermente maggiore. Ora la differenza fra la vita e la morte sarà fatta da un ulteriore lieve aumento della superficie alare.

E così via, fino a sviluppare ali vere e proprie.

Ci sono animali vivi oggi che illustrano magnificamente ogni stadio in questo continuum. Ci sono raganelle che volano come alianti grazie a grandi membrane interdigitali, serpenti volanti dal corpo appiattito come un nastro, capaci di aumentare la portanza accorciando in volo il loro corpo con una serie di spire a S, sauri - come il drago volante - che volano distendendo una membrana cutanea sostenuta da prolungamenti delle costole; e varie specie diverse di mammiferi che volano come alianti con membrane distese fra i loro arti, mostrandoci come deve avere avuto inizio il volo fra i pipistrelli. A dispetto della letteratura creazionistica, non solo sono comuni animali con «mezza ala», ma anche animali con un quarto di ala, con tre quarti di ala e così via. L'idea di un continuo nell'evoluzione dell'ala diventa ancora più convincente quando ricordiamo che gli animali molto piccoli tendono a librarsi dolcemente in aria, quale che sia la loro forma. La ragione per cui quest'argomentazione è persuasiva è che esiste un continuo con infinite gradazioni fra piccolo e grande.

L'idea di piccoli mutamenti cumulati nel corso di molti stadi è un'idea immensamente efficace, capace di spiegare una gamma enorme di cose che altrimenti sarebbero inspiegabili. Come ebbero origine i serpenti velenosi? Molti animali mordono, e la saliva di qualche animale contiene proteine che, entrando in una ferita, possono causare una reazione allergica. Persino i cosiddetti serpenti non velenosi possono infliggere morsi che causano in alcune persone una reazione dolorosa. C'è una serie continua graduata fra la saliva comune e un veleno mortale.

Come ebbero origine le orecchie? Qualsiasi pezzo di epidermide può scoprire vibrazioni se entra in

contatto con oggetti vibranti. Questo è uno sviluppo naturale del senso del tatto. La selezione naturale potrebbe aver perfezionato facilmente questa facoltà per mezzo di passaggi gradualmente fino a raggiungere una sensibilità sufficiente per captare vibrazioni per contatto molto lievi. A questo punto un organismo sarebbe stato automaticamente abbastanza sensibile da captare vibrazioni (stati di rarefazione e compressione) dell'aria di sufficiente energia e/o originate da una sorgente abbastanza vicina. La selezione naturale avrebbe favorito a questo punto l'evoluzione di speciali organi - le orecchie - per captare vibrazioni dell'aria provenienti da sorgenti a distanze sempre maggiori. È facile vedere che dovette esserci una sequenza continua di piccoli perfezionamenti gradualmente, dalla percezione di vibrazioni meccaniche a un udito perfetto. Come ebbe inizio l'ecolocazione? Qualsiasi animale dotato di un udito può percepire un'eco. Spesso gli esseri umani ciechi imparano a servirsi di questi echi per orientarsi. Una versione rudimentale di tale abilità in mammiferi ancestrali dovette fornire alla selezione naturale un'abbondante materia prima su cui costruire, conducendo per gradi all'alta perfezione dei pipistrelli.

Una vista al cinque per cento è preferibile all'assenza totale della vista. Un udito al cinque per cento è preferibile a un'assenza totale dell'udito. Una capacità di volare al cinque per cento è sempre meglio che non possedere alcuna attitudine al volo. È perfettamente credibile che ogni organo o apparato che vediamo nella realtà sia il prodotto di una traiettoria regolare attraverso lo spazio animale, una traiettoria in cui ogni stadio intermedio diede un contributo alla sopravvivenza e alla riproduzione. Ogni volta che in un animale vivente abbiamo un X, dove X è un qualche organo troppo complesso per poter avere avuto origine per caso in un singolo passo, allora, secondo la teoria dell'evoluzione per selezione naturale, dev'essersi verificato il caso in cui una frazione di X era meglio dell'assenza totale di X, che due frazioni di X dovevano essere meglio di una e che un intero X doveva essere meglio di nove decimi di un X. Io non ho alcuna difficoltà ad accettare che queste affermazioni valgano per gli occhi, per le orecchie, comprese le orecchie di pipistrelli, per le ali, per il mimetismo animale, per le mascelle dei serpenti, per i pungiglioni, per le abitudini dei cuculi e per tutti gli altri esempi presentati nella propaganda contro l'evoluzione. Senza dubbio ci sono numerosi X concepibili per i quali queste affermazioni non sarebbero vere, numerose vie evolutive concepibili per le quali le forme intermedie non sarebbero miglioramenti rispetto alle forme presenti in organismi anteriori. Ma questi X non si trovano nel mondo reale. Darwin scrisse (nell'Origine delle specie, capitolo VI): Se si potesse dimostrare l'esistenza di un qualche organo complesso che non avrebbe potuto formarsi per numerose lievi modificazioni successive, la mia teoria cadrebbe assolutamente.

Centocinquanta anni dopo, noi sappiamo sugli animali e sulle piante molte cose di più di ciò che sapeva Darwin, e nondimeno non mi è noto un singolo caso di un organo complesso che non avrebbe potuto formarsi per numerose lievi modificazioni successive. Io non credo che un caso del genere si troverà mai. Se lo si troverà - dovrà essere un organo realmente complesso e, come vedremo in capitoli successivi, noi dovremo mettere la massima cura nel definire che cosa intendiamo per «lievi» modificazioni - io smetterò di credere nel darwinismo.

A volte la storia di stadi intermedi gradualmente è scritta in modo chiaro nella forma di animali moderni, assumendo addirittura la forma di autentiche imperfezioni nel disegno finale. Stephen Jay Gould, nel suo eccellente saggio sul Pollice del panda, ha sostenuto che l'evoluzione potrebbe essere supportata in modo più convincente dalle prove di evidenti imperfezioni che non dalla prova della perfezione. Io mi limiterò a citare solo due esempi.

I pesci che vivono sul fondo del mare traggono beneficio dal fatto di essere piatti e di poter nascondere la loro silhouette. Ci sono due tipi molto diversi di pesci piatti che vivono sul fondo del mare, i quali hanno sviluppato la loro forma piatta in modi del tutto differenti. Razze, pastinache e torpedini, parenti degli squali, sono diventate piatte in quello che potrebbe essere considerato un modo ovvio. Il loro corpo è cresciuto lateralmente a formare grandi «ali». Esse sono come squali passati sotto un rullo compressore, ma rimangono simmetriche e presentano la divisione usuale fra «sopra e sotto». Sogliole, platesse, passere di mare e simili si sono appiattite in un modo diverso. Esse sono pesci ossei (con vescica natatoria) imparentati con le aringhe, le trote e via dicendo, e non hanno niente a che fare con gli squali.

A differenza degli squali, i pesci ossei hanno una spiccata tendenza ad appiattirsi in senso verticale. Un'aringa, per esempio, è molto più «alta» che larga. Essa usa il suo corpo appiattito verticalmente come una superficie per il nuoto, ondolandolo nell'acqua mentre nuota. Era perciò naturale, quando gli antenati della passera di mare e della sogliola andarono a vivere sul fondo del mare, che si coricassero su un fianco anziché sul ventre, come i progenitori delle razze e delle pastinache. Questo fatto pose però il problema che un occhio rimaneva sempre immerso nella sabbia del fondo, finendo con l'essere inutilizzato. Nell'evoluzione questo problema fu risolto per mezzo della «migrazione» dell'occhio inferiore sul fianco superiore.

Noi vediamo questa migrazione dell'occhio ripetersi nello sviluppo di ogni pesce osseo appiattito. Un pesce piatto giovane comincia la sua vita nuotando in prossimità della superficie, ed è simmetrico e appiattito verticalmente come un'aringa. Successivamente, però, il cranio comincia a crescere in uno strano modo asimmetrico, contorto, così che un occhio, per esempio il sinistro, passa sopra il vertice della testa per terminare la sua migrazione sul fianco superiore. Il giovane pesce si stabilisce allora sul fondo con entrambi gli occhi rivolti verso l'alto, formando una bizzarra immagine picassiana. Per inciso, alcune specie di pesci si posano sul fianco destro, altre sul fianco sinistro, altre ancora su uno qualsiasi dei due.

L'intero cranio di un pesce osseo piatto conserva le tracce di torsione e distorsione che ne attestano l'origine. La sua stessa imperfezione è una testimonianza efficace della sua antica storia, una storia di mutamento graduale più che di disegno intenzionale. Nessun progettista intelligente avrebbe concepito una tale mostruosità se avesse avuto la facoltà di creare liberamente un pesce piatto su un foglio bianco. Io ho il sospetto che la maggior parte dei progettisti intelligenti riuscirebbero a escogitare qualcosa di meglio di una razza. Ma l'evoluzione non prende mai l'avvio da un foglio bianco. Essa deve partire da qualcosa che c'è già. Nel caso dei progenitori delle razze, questo qualcosa erano gli squali che non vivevano sul fondo ma nuotavano liberamente. Gli squali, in generale, non sono appiattiti verticalmente come i pesci ossei, per esempio le aringhe. Semmai, sono già leggermente appiattiti dal dorso al ventre. Ciò significa che, quando qualche antico squalo andò a vivere sul fondo marino, ci fu una progressione facile e continua verso la forma delle razze, progressione nella quale ogni forma intermedia costituiva un lieve miglioramento, date le condizioni vigenti sul fondo, rispetto al suo predecessore lievemente meno appiattito.

D'altra parte, quando il progenitore delle razze e delle passere di mare - che come le aringhe era appiattito verticalmente andò a vivere sul fondo, si trovò meglio a coricarsi su un fianco che non a bilanciarsi precariamente sulla lama di coltello del suo ventre! Anche se il suo corso evolutivo lo avrebbe infine condotto alle distorsioni complicate e probabilmente costose implicite nell'avere due occhi su un fianco, e benché il modo di essere un pesce piatto esibito dalle razze fosse forse in ultima analisi la soluzione migliore anche per i pesci ossei, le presunte forme intermedie che seguirono questo percorso evolutivo ottennero evidentemente a breve termine risultati meno brillanti rispetto ai loro rivali che giacevano su un fianco, i quali risultarono infatti molto più efficienti, in una prospettiva a breve termine, nell'occultare in tal modo il loro profilo.

Nell'iperspazio genetico c'è una traiettoria continua che connette i pesci ossei ancestrali che nuotavano liberamente ai pesci piatti che si posano sul fondo su un fianco, col loro cranio deformato. Non esiste invece una tale traiettoria regolare che connetta quei lontani pesci ossei ancestrali con pesci piatti che giacciono sul ventre.

Questa speculazione non può però essere tutta la verità, giacché esistono pesci ossei che sono diventati piatti in modo simmetrico, come le razze. Forse i loro antenati che nuotavano liberamente erano già appiattiti per qualche altra ragione.

Il mio secondo esempio di una progressione evolutiva che non si verificò a causa dei caratteri svantaggiosi delle forme intermedie - anche se avrebbe potuto avere, verificandosi, risultati migliori di quelli raggiunti dall'evoluzione reale - concerne la retina dei nostri occhi (e di quelli di tutti i vertebrati). Come qualsiasi altro nervo, il nervo ottico è una sorta di cavo di un circuito elettrico, un fascio di fili «isolati» separati, in questo caso in numero di circa tre milioni. Ognuno dei tre milioni di fili conduce da una cellula nella retina al cervello. Possiamo concepirli come i fili che vanno da un pannello di tre milioni di fotocellule (in realtà tre milioni di stazioni ripetitrici che raccolgono

informazioni da un numero ancora maggiore di fotocellule) al computer che deve elaborare l'informazione nel cervello. Questi fili, provenienti dall'intera superficie della retina, si raccolgono in un singolo fascio, che è il nervo ottico dell'occhio in oggetto.

Qualsiasi ingegnere sarebbe naturalmente indotto a supporre che le fotocellule fossero rivolte verso la luce, con i fili diretti all'indietro verso il cervello. Egli si farebbe beffe di chi gli dicesse che le fotocellule potrebbero essere puntate in direzione opposta alla luce, e che i fili potrebbero dipartirsi dal lato più vicino alla luce. Eppure questa è esattamente la situazione che si riscontra nella retina di tutti i vertebrati. Ogni fotocellula è orientata in realtà in direzione opposta a quella ottimale, con i fili che ne escono dal lato più vicino alla luce. Il filo deve percorrere la superficie della retina sino a un punto in cui si immerge in essa attraverso un foro (la cosiddetta «macchia cieca») per andare a unirsi al nervo ottico. Ciò significa che la luce, anziché poter pervenire indisturbata alle fotocellule, deve attraversare una foresta di fili di connessione, soffrendo presumibilmente almeno di una certa attenuazione e distorsione (in realtà forse non molto, ma è soprattutto il principio che urterebbe qualsiasi ingegnere rigoroso!).

Io non conosco l'esatta spiegazione di questo strano stato di cose. Il periodo dell'evoluzione che ha condotto a esso appartiene a un passato molto lontano. Sono però pronto a scommettere che esso abbia qualcosa a che fare con la traiettoria, il percorso evolutivo attraverso l'equivalente nella vita reale del Paese dei Biomorfi, che dovrebbe essere seguita per far ruotare la retina nella situazione più razionale, a partire dall'organo ancestrale - qualunque esso possa essere stato - che precedette l'occhio.

Probabilmente una tale traiettoria esiste, ma quando quel percorso ipotetico si realizzò nel corpo reale di animali intermedi, dovette rivelarsi svantaggioso, temporaneamente svantaggioso, ma questo è appunto quanto basta. Le forme intermedie vedevano forse ancora peggio dei loro imperfetti progenitori, e non è una consolazione pensare che esse stessero costruendo una vista migliore per i loro lontani discendenti! Ciò che importa è la sopravvivenza nel qui e ora.

La «legge di Dolio» (dal paleontologo Louis Dolio) dice che l'evoluzione è irreversibile.

Quest'asserzione viene spesso confusa con una quantità di assurdità idealistiche circa l'inevitabilità del progresso, spesso associate a tesi strampalate, come quella che l'evoluzione «viola la seconda legge della termodinamica» (le persone appartenenti alla metà della popolazione colta che, secondo il romanziere C.P. Snow, sanno che cos'è la seconda legge, si renderanno facilmente conto che questa legge non è violata dall'evoluzione più di quanto sia violata dalla crescita di un bambino).

Non c'è alcuna ragione per cui certe tendenze generali nell'evoluzione non dovrebbero invertirsi. Se per un certo periodo dell'evoluzione c'è una tendenza verso corna ramificate, può esserci benissimo una tendenza successiva verso corna più corte. La legge di Dolio è in realtà solo un'affermazione sull'improbabilità statistica che una traiettoria evolutiva (o, di fatto, qualsiasi traiettoria particolare) venga seguita esattamente due volte, una volta in un senso e l'altra nel senso opposto. Una singola mutazione può essere rovesciata facilmente. Ma per quantità maggiori di mutazioni, persino nel caso dei biomorfi con i loro nove piccoli geni, lo spazio matematico di tutte le traiettorie possibili è così grande che la probabilità che due traiettorie arrivino esattamente allo stesso punto è infinitamente piccola. Ciò vale ancor più per gli animali veri, col loro numero di geni enormemente maggiore. Nella legge di Dolio non c'è niente di misterioso o di mistico, né c'è qualcosa che noi possiamo sottoporre a verifica in natura. Essa è una semplice conseguenza delle leggi elementari della probabilità.

Esattamente per la stessa ragione, è estremamente improbabile che uno stesso percorso evolutivo possa essere seguito esattamente due volte. E sembra similmente improbabile, per le stesse ragioni statistiche, che due linee evolutive debbano convergere esattamente verso lo stesso punto finale a partire da punti di partenza diversi.

È perciò una testimonianza tanto più sorprendente del potere della selezione naturale che nel mondo reale si possono trovare numerosi esempi in cui linee di evoluzione indipendenti sembrano essersi dirette, da punti di partenza molto diversi, verso quello che sembra quasi esattamente lo stesso obiettivo.

Quando consideriamo le cose nei particolari troviamo - e ci sarebbe di che preoccuparsi se non

fosse così - che la convergenza non è totale. Le diverse linee evolutive tradiscono le loro origini indipendenti in una varietà di particolari. Per esempio gli occhi del polpo sono molto simili ai nostri, ma i fili che escono dalle sue fotocellule non sono rivolti all'esterno verso la luce, come i nostri. Gli occhi del polpo sono, sotto questo aspetto, progettati «con più intelligenza» dei nostri. Essi sono pervenuti a un obiettivo simile prendendo l'avvio da un punto di partenza sorprendentemente diverso. E la diversità dell'origine si manifesta proprio in particolari come questi.

Tali somiglianze superficialmente convergenti sono spesso notevolissime, e io dedicherò il resto del capitolo all'esame di alcune di esse. Esse forniscono dimostrazioni sorprendenti del potere della selezione naturale di concepire buoni progetti. Eppure il fatto che progetti superficialmente simili presentino anche differenze fra loro attesta l'indipendenza della loro origine e della loro storia evolutiva. La ragione di fondo è che, se un progetto è abbastanza buono da evolversi una volta, lo stesso principio di progettazione è abbastanza buono da evolversi due volte, da punti di partenza diversi, in parti differenti del regno animale. Quest'argomentazione non potrebbe trovare illustrazione migliore che nel caso da noi usato come esempio basilare del buon progetto stesso: l'ecolocazione.

La maggior parte di ciò che sappiamo sull'ecolocazione proviene dai pipistrelli (e da strumenti umani), ma essa è presente anche in un certo numero di altri gruppi di animali che non hanno alcun rapporto di parentela fra loro. L'ecolocazione compare in almeno due gruppi separati di uccelli ed è stata portata a un livello di complessità molto alto da delfini e balene. Essa fu inoltre «scoperta» indipendentemente da almeno due gruppi differenti di pipistrelli. Gli uccelli che la praticano sono i guaciari del Sudamerica e la salangana, un rondone dell'Estremo Oriente il cui nido viene usato per preparare il tipico brodo cinese di «nidi di rondine». Entrambi questi uccelli nidificano in caverne buie in cui penetra ben poca luce, ed entrambi navigano nel buio servendosi dell'eco dei loro clic vocali. In entrambi i casi si tratta di suoni udibili dagli esseri umani, non di ultrasuoni come nel caso dei pipistrelli. In effetti, nessuna delle due specie di uccelli sembra avere sviluppato la tecnica dell'ecolocazione a livelli paragonabili a quella dei chiroterteri. I loro clic non sono a modulazione di frequenza, né sembrano adatti alla misurazione della velocità mediante l'effetto Doppler. È probabile, come nel caso del pipistrello frugivoro *Rousettus*, che essi servano semplicemente a misurare l'intervallo di silenzio che intercorre fra ciascun clic e la sua eco.

In questo caso possiamo essere assolutamente certi che le due specie di uccelli abbiano inventato l'ecolocazione indipendentemente dai pipistrelli e in modo autonomo l'una specie dall'altra.

La linea di ragionamento è di un tipo che viene usato spesso dagli evoluzionisti. Noi osserviamo tutte le migliaia di specie di uccelli e osserviamo che la grande maggioranza di essi non usano l'ecolocazione. Solo due piccoli generi isolati di uccelli la usano, e questi due generi non hanno nulla in comune fra loro oltre al fatto di nidificare in caverne. Anche se noi crediamo che tutti gli uccelli e i pipistrelli debbano avere un progenitore comune purché seguiamo a ritroso la loro linea genealogica fino a un passato sufficientemente lontano, tale progenitore comune fu anche il progenitore di tutti i mammiferi (compresi noi stessi) e di tutti gli uccelli. La grande maggioranza dei mammiferi e la grande maggioranza degli uccelli non usano l'ecolocazione, ed è molto probabile che non la usasse neppure il loro progenitore comune (il quale neppure volava: questa è un'altra tecnologia che è stata sviluppata indipendentemente numerose volte). Ne segue che la tecnologia dell'ecolocazione dev'essersi evoluta indipendentemente nei pipistrelli e negli uccelli esattamente come fu sviluppata indipendentemente da scienziati britannici, americani e tedeschi. Lo stesso tipo di ragionamento, su scala minore, conduce alla conclusione che neppure il comune antenato del guaciaro e della salangana usava l'ecolocazione e che questi due generi devono avere sviluppato la stessa tecnologia l'uno indipendentemente dall'altro.

Anche fra i mammiferi, i pipistrelli non sono l'unico gruppo ad avere sviluppato indipendentemente la tecnologia dell'ecolocazione. Vari gruppi diversi di animali, come per esempio toporagni, ratti e pinnipedi, sembrano usare in qualche misura gli echi per orientarsi, come fanno anche gli esseri umani ciechi, ma gli unici animali a rivaleggiare in raffinatezza tecnologica con i pipistrelli sono i cetacei. I cetacei si suddividono in due gruppi principali: i denticeti (o cetacei con denti) e i

misticeti (o cetacei con fanoni). Entrambi questi gruppi, ovviamente, sono mammiferi discesi da progenitori terrestri, e potrebbero benissimo avere «inventato» il modo di vita dei cetacei l'uno indipendentemente dall'altro, a partire da progenitori terrestri diversi. I denticeti comprendono i capodogli, le orche e le varie specie di delfini, i quali cacciano tutti prede piuttosto grandi, come pesci e calamari di grandi dimensioni, che afferrano con le mascelle.

Vari denticeti, fra cui sono stati studiati a fondo solo i delfini, hanno sviluppato nella loro testa complesse apparecchiature di ecolocazione.

I delfini emettono rapide sequenze di clic di tono alto, alcuni dei quali udibili da noi, mentre altri sono ultrasonici. È probabile che il «melone», la protuberanza sulla fronte del delfino, che somiglia - felice coincidenza - alla cupola stranamente sporgente del radar del Nimrod, un aereo usato con compiti di sorveglianza e di preallarme, abbia qualcosa a che fare con la direzionalità dei segnali sonar emessi dal cetaceo, ma non se ne comprende l'esatto funzionamento. Come nel caso dei pipistrelli, c'è una «frequenza di crociera» dei clic relativamente, bassa, che sale a un ronzio ad alta velocità (400 clic al secondo) quando l'animale si avvicina alla preda. Anche la frequenza di crociera «lenta» è piuttosto rapida. I delfini fluviali che vivono in acqua fangosa sono probabilmente i più abili nell'uso dell'ecolocazione, ma alcuni esperimenti hanno dimostrato che anche i delfini che vivono in mare aperto possono possedere questa capacità in misura spiccata. Un tursiope troncato o delfino dal naso a bottiglia dell'Atlantico è in grado di discriminare fra cerchi, quadrati e triangoli (aventi tutti un'area uguale standardizzata), usando solo il suo sonar. Esso è in grado di stabilire quale di due bersagli è il più vicino quando la differenza fra le loro distanze è di soli 3 centimetri a una distanza complessiva di circa sei metri e mezzo. Questo delfino è in grado di scoprire una sfera d'acciaio grande la metà di una palla da golf a una distanza di 65 metri.

Questa prestazione è inferiore alla vista umana in piena luce, ma probabilmente migliore della vista umana alla luce della luna.

È stato avanzato l'interessante suggerimento che i delfini, se decidono di usarlo, abbiano un mezzo potenzialmente facilissimo di comunicarsi «immagini mentali». Tutto ciò che dovrebbero fare è usare la loro voce altamente versatile per imitare il suono che sarebbe prodotto dall'eco riflessa da un particolare oggetto. In questo modo potrebbero trasmettersi immagini mentali di tali oggetti. Non c'è alcuna prova a sostegno di questo interessante suggerimento. Teoricamente i pipistrelli potrebbero fare la stessa cosa, ma i delfini sembrano più adatti a una cosa del genere avendo in generale un senso più spiccato della socialità.

Essi sono probabilmente anche «più abili», ma questa non è necessariamente una considerazione pertinente. Gli strumenti che si richiederebbero per comunicare immagini di echi non sono più complessi di quelli che pipistrelli e delfini già usano per l'ecolocazione. E ci sarebbe sempre un continuo facile, graduale, fra usare la voce per produrre echi e usarla per imitare echi.

Almeno due gruppi di pipistrelli, due gruppi di uccelli, cetacei denticeti e probabilmente, in misura minore, vari altri gruppi di mammiferi, hanno quindi presentato tutti indipendentemente, negli ultimi cento milioni di anni, una convergenza verso la tecnologia del sonar. Noi non abbiamo alcun modo per sapere se anche qualche altro animale oggi estinto - forse gli pterodattili? abbia sviluppato autonomamente questa tecnologia.

Finora non si sono trovati né insetti né pesci che usino il sonar, ma due gruppi diversi di pesci, uno in Sudamerica e uno in Africa, hanno sviluppato un sistema di navigazione in qualche misura simile, che appare altrettanto perfezionato e che può essere visto come una soluzione connessa ma diversa allo stesso problema. Questi pesci sono noti come pesci debolmente elettrici. La parola «debolmente» serve per differenziarli dai pesci fortemente elettrici, che usano campi elettrici non ai fini della navigazione ma per tramortire le loro prede. Anche questa tecnica di stordire le prede, per inciso, è stata inventata indipendentemente da vari gruppi di pesci privi di affinità fra loro, per esempio gli elettrofori o «anguille elettriche» (i quali non sono vere anguille, anche se hanno un corpo anguilliforme) e le torpedini.

I pesci debolmente elettrici del Sudamerica e dell'Africa non presentano alcuna affinità fra loro, ma vivono entrambi, nei loro rispettivi continenti, negli stessi tipi di acque, troppo fangose per consentire loro di usare in modo efficace la vista. Il principio fisico da essi sfruttato - quello dei

campi elettrici in acqua è ancor più estraneo alla nostra coscienza di quello dei pipistrelli e dei delfini. Noi, almeno, abbiamo un'idea soggettiva di che cosa sia un'eco, ma non abbiamo un'idea soggettiva se non estremamente vaga di che cosa voglia dire percepire un campo elettrico. Inoltre siamo venuti a conoscenza dell'esistenza dell'elettricità solo da un paio di secoli. Se, in quanto esseri umani soggettivi, non possiamo identificarci con i pesci elettrici e con la loro esperienza, possiamo però capirli in quanto fisici.

È facile vedere, quando apriamo un pesce sul nostro piatto prima di mangiarlo, che i muscoli a ciascun lato di ogni pesce sono disposti come una serie di segmenti, una batteria di unità muscolari. Nella maggior parte dei pesci essi si contraggono successivamente per dare al corpo un movimento sinuoso, ondulatorio, che lo spinge in avanti. Nei pesci elettrici, sia in quelli fortemente sia in quelli debolmente elettrici, tali muscoli sono diventati una batteria in senso elettrico. Ogni segmento («cellula») della batteria genera un voltaggio. Questi voltaggi sono connessi in serie lungo l'asse longitudinale del pesce così che, in un pesce fortemente elettrico come un elettroforo, l'intera batteria può arrivare a generare una corrente dell'intensità di 1 ampere a 650 volt. Un elettroforo è abbastanza potente da stordire un uomo. I pesci debolmente elettrici non hanno bisogno di alti voltaggi o di forti correnti per i loro fini, che si riducono alla sola raccolta di informazioni.

Il principio dell'elettrolocazione, com'è stato chiamato, è abbastanza ben compreso al livello della fisica, anche se non, ovviamente, al livello di una percezione intuitiva di quella che potrebbe essere l'esperienza di un pesce elettrico. L'esposizione che segue si applica altrettanto bene ai pesci debolmente elettrici africani e sudamericani: la convergenza è molto forte. La corrente elettrica esce dalla parte frontale del pesce, si propaga nell'acqua in linee che si incurvano e tornano all'estremità caudale del pesce. Non ci sono in realtà «linee» discrete bensì un «campo» continuo, un bozzolo invisibile di elettricità che circonda il corpo del pesce. Ai fini della visualizzazione umana la cosa più facile è però quella di pensare nei termini di una famiglia di linee curve che escono dal pesce attraverso una serie di oblò disposti lungo la sua parte frontale, si incurvano tutto attorno nell'acqua e rientrano di nuovo nel pesce alla punta della sua coda. Il pesce possiede l'equivalente di un minuscolo voltmetro che controlla il voltaggio a ogni «oblò». Se il pesce è sospeso in acqua aperta senza alcun ostacolo attorno, le linee sono curve regolari. I minuscoli voltmetri a ciascun oblò registrano tutti il voltaggio come «normale» per il loro oblò. Se invece in prossimità del pesce viene a trovarsi un qualche ostacolo, per esempio una pietra o una possibile preda, le linee del campo elettrico che colpiscono l'ostacolo ne vengono modificate. In conseguenza di questo fatto muterà il voltaggio agli oblò da cui escono le linee di corrente interessate, e i voltmetri appropriati registreranno le variazioni.

Così, in teoria, un computer, comparando i voltaggi registrati dai voltmetri a tutti gli oblò, potrebbe calcolare la figura degli ostacoli che si trovano attorno al pesce. Questo è, a quanto pare, ciò che fa il cervello del pesce. Ancora una volta, non per questo dobbiamo essere indotti a pensare che i pesci siano abili matematici. Essi hanno un apparato che risolve le equazioni necessarie, esattamente come il nostro cervello risolve inconsciamente equazioni ogni volta che noi afferriamo una palla. È molto importante che il corpo del pesce, quando esegue queste operazioni, si mantenga assolutamente rigido, poiché il computer nella sua testa non potrebbe tener conto delle distorsioni extra che verrebbero introdotte se il suo corpo ondulasse muovendosi come quello di un pesce comune. I pesci elettrici hanno trovato almeno due volte, indipendentemente, questo ingegnoso metodo di ecolocazione, ma hanno dovuto pagare un prezzo, quello di rinunciare al normale metodo di nuoto dei pesci, molto efficiente, mediante ondulazioni del corpo. Essi hanno risolto il problema mantenendo il corpo rigido come un manico di scopa, cosa consentita loro dal possesso di una singola lunga pinna sull'intera lunghezza del corpo. Invece di ondulare l'intero corpo, essi procedono quindi ondulando solo la pinna. Il movimento del pesce attraverso l'acqua è piuttosto lento, ma a quanto pare valeva la pena di sacrificare la velocità del movimento: i guadagni nella navigazione sembrano infatti di gran lunga superiori alle perdite conseguite dalla bassa velocità. Fatto affascinante, i pesci elettrici sudamericani pare abbiano trovato una soluzione quasi identica, anche se non del tutto, a quella degli africani. La differenza è rivelatrice: entrambi i gruppi hanno sviluppato una singola lunga pinna che corre lungo l'intera lunghezza del corpo, ma nei pesci

africani essa è in posizione dorsale mentre in quelli americani corre lungo il ventre. Questo tipo di differenze nei particolari è, come abbiamo visto, molto caratteristico dell'evoluzione convergente. Esso è ovviamente caratteristico anche dei progetti convergenti di ingegneri umani.

Benché la maggioranza dei pesci debolmente elettrici, tanto nel gruppo africano quanto in quello americano, emettano le loro scariche elettriche in impulsi discreti e siano chiamati specie «a impulsi», una minoranza di specie in entrambi i gruppi usa una tecnica diversa e sono chiamate specie «a onde». Io non mi soffermerò oltre su questa differenza. Quel che ci interessa ai fini di questo capitolo è il fatto che questa divisione in specie a impulsi e specie a onde si è evoluta due volte, indipendentemente, nei gruppi, senza alcuna parentela fra loro, del Nuovo e del Vecchio Mondo.

Uno degli esempi più bizzarri di evoluzione convergente che io conosca è quello delle cosiddette cicale periodiche. Prima di passare a esaminare questa convergenza, dovrei dare qualche informazione di carattere più generale concernente lo sfondo.

Molti insetti presentano una separazione piuttosto rigida fra uno stadio giovanile, in cui l'insetto trascorre la quasi totalità della sua vita impegnato esclusivamente a nutrirsi, e uno stadio adulto relativamente breve dedicato alla riproduzione. Le effimere, per esempio, spendono la maggior parte della loro vita nella forma di larve acquatiche, dopo di che emergono nell'aria per un solo giorno in cui dissipano l'intera loro vita adulta. Noi possiamo assimilare l'adulto all'effimero seme alato di una pianta come il platano e la larva alla pianta principale, con la differenza che il platano produce molti semi e li propaga nel corso di molti anni successivi, mentre una larva di effimera dà origine a un solo adulto proprio alla fine della sua vita. In ogni modo le cicale periodiche hanno portato all'estremo la tendenza dell'effimera. Gli adulti vivono solo per poche settimane mentre lo stadio «giovanile» (tecnicamente si tratta non di larve bensì di «ninfe») dura 13 anni (in alcune varietà) o 17 anni (in altre).

Questi insetti emergono allo stadio immaginale (la forma adulta) esattamente quasi nello stesso momento, dopo avere speso 13 (o 17) anni isolati nel terreno sotto forma di ninfe. Il flagello delle cicale, che si verifica in ogni area data esattamente a intervalli di 13 (o 17) anni, è uno spettacolare fenomeno di distruzione di colture che ha condotto scorrettamente a chiamare «locuste» questi insetti nel linguaggio comune in America. Le due varietà sono note rispettivamente come cicala dei tredici anni e cicala dei diciassette anni.

Ora, c'è in proposito un fatto veramente notevole. Risulta che non esiste solo una specie di cicala dei 13 anni e una specie dei 17 anni. Ci sono piuttosto tre specie, ciascuna delle quali ha sia una varietà o razza dei 13 anni sia una dei 17. La divisione in una razza dei 13 e una dei 17 anni è stata raggiunta indipendentemente, non meno di tre volte. È come se i periodi intermedi di 14, 15 e 16 anni fossero stati evitati in modo convergente non meno di tre volte. Perché? Non lo sappiamo.

L'unico suggerimento che sia stato trovato è che ciò che ce di speciale nel 13 e nel 17, in contrapposizione al 14, 15 e 16, è che sono numeri primi. Un numero primo è un numero che non è divisibile esattamente per alcun altro numero. Si pensa che una razza di animali che erompe regolarmente in veri e propri flagelli, provocando danni immensi alle colture, tragga vantaggio dal «sommergere» e affamare alternativamente i suoi nemici, predatori o parassiti.

E se questi flagelli saranno programmati con cura nel tempo in modo che si verifichino con l'intervallo di un numero primo di anni, sarà molto più difficile per i loro nemici sincronizzare i loro propri cicli di vita. Se le cicale raggiungessero lo stato adulto, per esempio, ogni 14 anni, potrebbero essere sfruttate da una specie di parassiti con un ciclo di vita di 7 anni. Questa è un'idea bizzarra, ma non più bizzarra del fenomeno stesso. Noi non sappiamo in realtà che cosa ci sia di speciale nei 13 e 17 anni. Quel che qui importa ai nostri fini è che in questi numeri dev'esserci qualcosa di speciale, poiché tre specie di cicale li hanno adottati indipendentemente.

Esempi di convergenza su vasta scala si hanno quando due o più continenti sono isolati fra loro da molto tempo e una varietà di «economie» parallele vengono adottate da animali non imparentati fra loro su ciascun continente. Per «economie» intendo modi di procurarsi i mezzi di sussistenza, come scavare alla ricerca di vermi o di formiche, andare a caccia di erbivori di grossa taglia, mangiare foglie sugli alberi. Un buon esempio è l'evoluzione convergente di un'intera varietà di economie dei

mammiferi nei continenti separati del Sudamerica, dell'Australia e del Vecchio Mondo. Questi continenti non furono sempre separati. Poiché la nostra vita si misura in decenni, e persino le nostre civiltà e dinastie si misurano solo in secoli, noi siamo abituati a pensare alla carta geografica del mondo, e ai profili dei continenti, come stabili nel tempo. La teoria della deriva dei continenti fu proposta molto tempo fa dal geofisico tedesco Alfred Wegener, che però fu oggetto di scherno da parte della maggioranza delle persone, anche di specialisti, fin molto tempo dopo la Seconda guerra mondiale. Il fatto ammesso che il profilo del margine orientale del Sudamerica e quello del margine occidentale dell'Africa combaciassero come due pezzi di un puzzle veniva considerato solo alla stregua di una curiosa coincidenza. Nel corso di una delle rivoluzioni più rapide e complete che la scienza abbia mai conosciuto, la teoria in precedenza controversa della «deriva dei continenti» è stata oggi universalmente accettata sotto il nome di tettonica a zolle (o tettonica a placche). Le prove a sostegno del fatto che i continenti si sono effettivamente spostati, che il Sudamerica si è davvero staccato dall'Africa, sono oggi letteralmente schiacciati, ma questo non è un libro di geologia e io non mi soffermerò quindi su questo punto. La cosa importante per noi è che la scala di tempo alla quale i continenti sono «andati alla deriva» è press'a poco uguale alla lenta scala di tempo alla quale si sono evolute le linee genealogiche degli animali, e noi non possiamo ignorare la deriva dei continenti se dobbiamo capire in che modo si sia verificata l'evoluzione degli animali su quei continenti.

Fino a circa 100 milioni di anni fa, quindi, il Sudamerica era unito all'Africa a est e all'Antartide a sud. L'Antartide era unita all'Australia, e l'India era unita all'Africa attraverso il Madagascar. Esisteva in effetti un immenso continente australe, noto a noi oggi col nome di Gondwana, formato dall'attuale Sudamerica, dall'Africa, dal Madagascar, dall'India, dall'Antartide e dall'Australia, tutti saldati assieme. C'era inoltre un singolo grande continente boreale detto Laurasia, formato dall'attuale Nordamerica, dalla Groenlandia, dall'Europa e dall'Asia (esclusa l'India). Il Nordamerica non era unito al Sudamerica. Circa 100 milioni di anni fa si verificò una grande frammentazione delle masse continentali, e i continenti cominciarono lentamente a scivolare verso le loro posizioni presenti (e continueranno ovviamente a muoversi in futuro). L'Africa si unì all'Asia attraverso l'Arabia e divenne parte del grande continente che noi oggi chiamiamo Vecchio Mondo. Il Nordamerica scivolò via allontanandosi dall'Europa, e l'Antartide si mosse verso sud fino a raggiungere la sua attuale posizione glaciale. L'India si staccò dall'Africa e, «navigando» attraverso quello che oggi si chiama Oceano Indiano, andò infine a schiantarsi contro l'Asia meridionale, determinando con la sua spinta la formazione dell'Himalaia. L'Australia scivolò via dall'Antartide verso il mare aperto e divenne un continente insulare separato da grandi distanze da ogni altro. Si dà il caso che la frammentazione del grande continente australe del Gondwana abbia avuto inizio durante l'epoca dei dinosauri. Quando i due continenti del Sudamerica e dell'Australia si separarono per cominciare i loro lunghi periodi di isolamento dal resto del mondo, trasportarono ciascuno con sé il proprio carico di dinosauri, e anche animali meno vistosi che sarebbero diventati i progenitori dei mammiferi moderni. Quando, parecchio tempo dopo, per ragioni che non sono comprese e che sono oggetto di molte speculazioni redditizie, i dinosauri (con l'eccezione del gruppo che oggi chiamiamo uccelli) si estinsero, questa estinzione di massa si verificò in tutto il mondo. Essa lasciò una nicchia vuota nelle «economie» praticabili dagli animali terrestri. Il vuoto fu riempito, nel corso di un periodo di milioni di anni di evoluzione, soprattutto da mammiferi. La cosa che interessa a noi qui è che ci furono tre nicchie vuote indipendenti, che furono riempite in modo autonomo da mammiferi in Australia, in Sudamerica e nel Vecchio Mondo.

I mammiferi primitivi presenti nelle tre aree in cui i dinosauri lasciarono vacanti più o meno simultaneamente le nicchie ecologiche erano tutti piuttosto piccoli e insignificanti, probabilmente notturni, e in precedenza erano stati oscurati e sovrastati dai dinosauri. Essi avrebbero potuto evolversi in direzioni radicalmente diverse nelle tre aree. In qualche misura proprio questo fu ciò che accadde. Nel Vecchio Mondo non c'è nulla che assomigli al bradipo gigante terribile del Sudamerica, oggi purtroppo estinto. La grande varietà dei mammiferi sudamericani comprendeva una cavia gigante oggi estinta, delle dimensioni di un moderno rinoceronte, ma appartenente ai roditori (parlando del rinoceronte devo specificare «moderno» perché la fauna del Vecchio Mondo

comprendeva un rinoceronte gigante delle dimensioni di una casa a due piani). Benché però i continenti separati producessero ciascuno i propri mammiferi unici, l'indirizzo generale dell'evoluzione in tutte le aree fu lo stesso. In tutte tre, i mammiferi presenti all'inizio generarono nel corso dell'evoluzione un ventaglio di tipi diversi e produssero per ogni «economia» uno specialista che, in molti casi, venne a presentare una somiglianza notevole con lo specialista corrispondente nelle altre due aree. Ogni «economia», come lo scavo di gallerie nel terreno, la caccia ai grandi erbivori, il pascolo nelle grandi pianure e così via, fu oggetto di un'evoluzione indipendente convergente in due o tre continenti separati. Oltre a questi tre siti principali di evoluzione indipendenti, anche grandi isole, come il Madagascar, presentano interessanti storie parallele proprie, nelle quali non mi addentrerò.

Lasciando da parte gli strani mammiferi australiani che depongono uova - l'ornitorinco e l'echidna -, i mammiferi moderni appartengono all'uno o all'altro di due grandi gruppi. Questi due gruppi sono i marsupiali (i cui figli alla nascita sono molto piccoli e vengono tenuti in una tasca, appunto il marsupio) e i placentali (cui apparteniamo anche noi). I marsupiali pervennero a dominare la storia dell'Australia e i placentali quella del Vecchio Mondo, mentre entrambi i gruppi svolsero ruoli importanti l'uno accanto all'altro in Sudamerica. La storia del Sudamerica è resa complicata dal fatto che questo continente fu soggetto a ondate sporadiche di invasione da parte di mammiferi provenienti dal Nordamerica.

Dopo aver definito la scena, possiamo ora passare a considerare alcune fra le «economie» e le convergenze stesse. Un'attività importante è connessa allo sfruttamento delle grandi estensioni erbose variamente note come praterie, pampas, savane ecc. Fra gli animali che sfruttarono questa risorsa furono gli equidi (di cui le principali specie africane sono chiamate zebre e i tipi del deserto asini) e i bovidi, come il bisonte del Nordamerica, oggi quasi estinto in seguito alla caccia spietata cui fu sottoposto dall'uomo nel secolo scorso. Gli erbivori hanno di norma un intestino molto lungo contenente vari tipi di batteri fermentatori, dato che l'erba è un cibo povero di energia e che richiede una lunga digestione. Anziché fare pasti a intervalli, normalmente gli erbivori mangiano di continuo. Un grande volume di materiale vegetale scorre nel loro organismo come un fiume durante l'intera giornata. Spesso questi animali sono molto grossi, e non di rado sono riuniti in grandi mandrie.

Ognuno di questi grandi erbivori rappresenta una montagna di cibo prezioso per qualsiasi predatore possa sfruttarlo. Di conseguenza esiste, come vedremo, un'«economia» molto diffusa consistente nel difficile compito di catturare e uccidere questi animali. Coloro che praticano quest'attività sono i predatori. In realtà, quando dico un'«economia», mi riferisco a un intero gruppo di specializzazioni a essa associate: leoni, leopardi, ghepardi, licaoni e iene praticano tutti la caccia, ciascuno nel suo modo specializzato. Lo stesso tipo di suddivisione si trova fra gli erbivori e in tutte le altre «economie».

Gli erbivori hanno organi di senso molto fini con i quali vigilano di continuo per accorgersi tempestivamente dell'avvicinarsi di predatori, e di solito sono capaci di correre molto velocemente per sottrarsi a essi. A questo scopo hanno spesso gambe lunghe e sottili, e corrono di norma sulla punta delle dita, che nel corso dell'evoluzione sono diventate particolarmente allungate e robuste. Le unghie alle estremità di queste dita specializzate sono diventate grandi e dure e noi le chiamiamo zoccoli. I bovidi hanno due dita ingrandite all'estremità di ciascuna gamba: il familiare zoccolo dipartito. I cavalli ebbero un'evoluzione abbastanza simile con la differenza che, probabilmente per ragioni storiche casuali, svilupparono un solo dito anziché due. Lo zoccolo è derivato da quello che era in origine il medio a cinque dita. Le altre dita sono scomparse quasi completamente nel corso dell'evoluzione, anche se ricompaiono occasionalmente in capricciosi atavismi.

Durante il periodo in cui cavalli e bovini si svilupparono in altre parti del mondo, il Sudamerica, come abbiamo visto, rimase isolato. Esso possiede però le sue grandi praterie e sviluppò i suoi gruppi separati di grandi erbivori per sfruttare tale risorsa.

Fra tali gruppi c'erano animali di grossa taglia simili a rinoceronti, che non avevano però alcuna connessione con i veri rinoceronti. Il cranio di alcuni fra i più antichi erbivori sudamericani suggerisce che essi abbiano «inventato» la proboscide indipendentemente dai veri elefanti. Alcuni

di questi animali assomigliavano a cammelli, altri non assomigliavano a nessun animale vivo sulla Terra oggi, o avevano l'aspetto di strane chimere di animali moderni. I liptoterni, per esempio, erano quasi incredibilmente simili ai cavalli nelle zampe, ma non avevano alcun rapporto di parentela con gli equidi. La loro somiglianza superficiale ai cavalli ingannò un esperto argentino dell'Ottocento, il quale pensò, con scusabile orgoglio nazionale, che essi fossero i progenitori di tutti i cavalli del resto del mondo. In realtà la loro somiglianza con i cavalli era solo superficiale, ed era il prodotto di una convergenza. La vita nelle praterie è molto simile in tutto il mondo e cavalli e liptoterni svilupparono indipendentemente le stesse qualità per far fronte ai problemi della vita nelle praterie. In particolare, i liptoterni, come i cavalli, persero tutte le dita tranne il dito medio di ogni zampa, che divenne grande quanto l'articolazione inferiore della zampa stessa e che sviluppò uno zoccolo. La zampa di un liptoterno è quasi indistinguibile da quella di un cavallo, anche se i due animali sono solo parenti molto lontani fra loro.

In Australia ci sono grandi erbivori molto diversi: i canguri. I canguri hanno lo stesso bisogno di muoversi rapidamente, ma lo hanno soddisfatto in un modo diverso. Anziché sviluppare il galoppo su quattro zampe portandolo all'alto livello di perfezione raggiunto dai cavalli (e presumibilmente dai liptoterni), hanno perfezionato un'andatura diversa, consistente in salti su due zampe col bilanciamento del corpo per opera di una grossa coda. C'è poco vantaggio nel dissertare su quale di questi due tipi di andatura sia «migliore». Ognuno di essi è altamente efficace se il corpo si evolve in modo tale da sfruttarlo appieno. Cavalli e liptoterni seppero trarre il massimo vantaggio dal galoppo a quattro zampe, e finirono quindi con l'avere zampe quasi identiche. I canguri sfruttarono invece i salti a due zampe e finirono quindi con l'avere le poderose zampe posteriori e la grande coda che sono una loro esclusività (almeno dopo il tempo dei dinosauri). Canguri e cavalli pervennero a collocarsi in posizioni finali diverse nello «spazio animale», probabilmente in conseguenza di qualche differenza accidentale nel loro punto di partenza.

Passando ora ai predatori a cui i grandi erbivori cercavano di sottrarsi con la fuga, troviamo alcune convergenze più affascinanti. Nel Vecchio Mondo abbiamo familiarità con cacciatori di grossa taglia come lupi, cani, iene e i grandi felidi: leoni, tigri, leopardi e ghepardi. Un grande felide che si è estinto solo recentemente è la «tigre» dalle zanne a sciabola, così chiamata dagli enormi canini che sporgevano dalla mascella superiore di quelle che dovevano essere fauci terrificanti. Fino a poco tempo fa non ci furono veri felidi e veri canidi in Australia o nel Nuovo Mondo (i puma e i giaguari si sono evoluti recentemente da felidi del Vecchio Mondo). In entrambi i continenti c'erano però equivalenti marsupiali. In Australia il tilacino, o «lupo» marsupiale (spesso chiamato lupo tasmaniano perché sopravvisse un po' più a lungo in Tasmania che in Australia), fu tragicamente sospinto all'estinzione meno di un secolo fa, massacrato in massa dagli esseri umani come animale dannoso o semplicemente per «sport» (c'è una lieve speranza che esso possa ancora sopravvivere in parti remote della Tasmania, le quali sono oggi minacciate esse stesse di distruzione al fine di fornire «occupazione» a esseri umani). Il tilacino non dev'essere, ovviamente, confuso col dingo, che è un vero canide, introdotto in Australia più recentemente dagli aborigeni. Un film girato negli anni Trenta in cui si vede l'ultimo tilacino noto mentre cammina avanti e indietro senza requie nella sua gabbia al giardino zoologico ci mostra un animale stranamente simile a un cane, la cui natura marsupiale viene tradita solo dal modo lievemente diverso di tenere il bacino e le zampe posteriori, cosa che ha probabilmente a che fare col problema di trovare una posizione idonea per il marsupio. Per qualsiasi cinofilo la contemplazione di questo approccio alternativo al «progetto» del cane, questo essere che ha seguito un'evoluzione parallela lungo una via separata da 100 milioni di anni, questo cane dell'altro mondo dall'aspetto in parte familiare e in parte, nondimeno, estremamente estraneo, è un'esperienza toccante. Può darsi che i tilacini siano stati un flagello per l'uomo, ma l'uomo è stato certamente un flagello molto peggiore per essi; oggi non ci sono più tilacini e c'è un'eccedenza considerevole di esseri umani.

Neppure in Sudamerica ci furono veri canidi o felidi durante il lungo periodo di isolamento di cui ci stiamo occupando ma, come in Australia, ci furono equivalenti marsupiali. Il più spettacolare fu probabilmente il *Thylacosmilus*, dall'aspetto esattamente identico alla «tigre» dalle zanne a sciabola estinta solo di recente nel Vecchio Mondo, forse ancor più spettacolare se il lettore capisce quel che

voglio dire. Le sue fauci, armate di zanne possenti, erano ancora più ampie, e immagino che quest'animale fosse ancor più terrificante. Il suo nome ricorda la sua superficiale affinità con la tigre dalle zanne a sciabola (*Smilodon*) e col lupo marsupiale (*Thylacinus*), ma se consideriamo la sua linea genealogica era molto lontano da entrambi. Esso è leggermente più vicino al tilacino, dato che sono entrambi marsupiali, ma i due hanno sviluppato la loro struttura corporea di grandi carnivori su continenti diversi, indipendentemente l'uno dall'altro e dai carnivori placentali, i veri felidi e canidi del Vecchio Mondo.

L'Australia, il Sudamerica e il Vecchio Mondo offrono numerosi ulteriori esempi di evoluzione convergente multipla. L'Australia ha una «talpa» marsupiale che è superficialmente quasi indistinguibile dalle talpe familiari di altri continenti, a parte il marsupio, procurandosi i mezzi di sostentamento nello stesso modo delle altre talpe e possedendo zampe anteriori enormemente irrobustite per poter scavare nel suolo con efficacia. In Australia c'è un topo marsupiale, anche se in questo caso la somiglianza non è tanto stretta e anche se esso non si procura da vivere esattamente nello stesso modo. La caccia alle formiche (dove il termine «formiche» viene esteso a comprendere per comodità anche le termiti) è un'«economia» che è stata adottata qui da una varietà di mammiferi convergenti. Essi possono essere suddivisi in animali che scavano, animali che si arrampicano sugli alberi e animali che vagano sul suolo. In Australia, come possiamo attenderci, c'è un cacciatore di formiche marsupiale.

Chiamato *Myrmecobius* (mirmecobio), ha muso lungo e sottile per poterlo infilare nei nidi di formiche, e una lunga lingua viscosa con cui cattura le sue prede. È un animale che vive sul suolo. L'Australia ha anche un cacciatore di formiche scavatore, l'echidna istrice. Non si tratta di un marsupiale, ma di un membro del gruppo di mammiferi che depongono uova, i monotremi, i quali sono così lontani da noi che i marsupiali sono al confronto nostri cugini stretti. Anche l'echidna istrice ha un lungo muso appuntito, ma gli aculei le danno una somiglianza superficiale a un porcospino piuttosto che a un formichiere tipico.

Il Sudamerica avrebbe potuto avere facilmente un formichiere marsupiale assieme alla sua «tigre» dalle zanne a sciabola marsupiale, ma si dà il caso che la nicchia dei formichieri fosse già occupata da molto tempo da mammiferi placentali. Il più grande di tutti i formichieri sudamericani attuali è il formichiere gigante o dalle tre dita (*Myrmecophaga*, che in greco significa semplicemente mangiatore di formiche), il grande formichiere che vaga nelle savane del Sudamerica e che ha forse la specializzazione più estrema del mondo in questo compito. Come il mirmecobio australiano, che è un marsupiale, ha muso lungo e appuntito - in questo caso estremamente lungo e appuntito - e lingua vischiosa estremamente lunga. In Sudamerica vivono anche un piccolo formichiere arboricolo, che è uno stretto parente del formichiere gigante e dà l'impressione di esserne una versione in miniatura e meno estrema, il formichiere dalle due dita, e una terza forma, intermedia, il tamandua dalle quattro dita. Pur essendo mammiferi placentali, questi formichieri sono molto diversi da qualsiasi animale placentale del Vecchio Mondo. Essi appartengono a una famiglia esclusivamente sudamericana, che comprende anche gli armadilli e i bradipi. Quest'antica famiglia placentale coesistette con i marsupiali sin dai primi tempi dell'isolamento del continente sudamericano.

I cacciatori di formiche del Vecchio Mondo comprendono varie specie di pangolini in Africa e in Asia, che vanno da forme arboricole a forme scavatrici, tutte simili in aspetto a pigne e tutte col muso appuntito. In Africa vive anche lo strano oritteropo, che è parzialmente specializzato a scavare nel terreno. Un carattere che accomuna tutti i mangiatori di formiche, siano essi marsupiali, monotremi o placentali, è un metabolismo estremamente basso. Il ritmo metabolico è il ritmo a cui funziona la loro «combustione» chimica, la quale viene misurata nel modo migliore attraverso la temperatura del sangue. Nei mammiferi in generale si tende ad avere una dipendenza del ritmo metabolico dalle dimensioni del corpo. Gli animali più piccoli tendono ad avere un consumo di energia proporzionalmente elevato e quindi un alto ritmo metabolico, esattamente nello stesso modo in cui il motore delle macchine piccole tende a fare un numero di giri maggiore di quello delle macchine più grandi. Alcuni animali hanno però un ritmo metabolico proporzionalmente elevato in relazione alle loro dimensioni, e gli animali mangiatori di formiche, quali che siano la loro origine e

i loro rapporti di parentela, tendono ad avere un ritmo metabolico molto basso in relazione alle loro dimensioni. Non è chiaro perché sia così, ma questo fatto è una convergenza così sorprendente fra gli animali che non hanno in comune quasi nient'altro oltre all'abitudine di mangiare formiche, che deve avere quasi sicuramente un qualche rapporto con quest'abitudine.

Come abbiamo detto, le «formiche» mangiate dai formichieri e da altri animali di abitudini simili non sono spesso vere formiche ma termiti. Le termiti vengono chiamate talvolta «formiche bianche», ma sono insetti affini alle blatte piuttosto che alle vere formiche, le quali sono imenotteri, e sono quindi imparentate con le api e le vespe. Le termiti assomigliano superficialmente alle formiche perché hanno adottato per convergenza le stesse abitudini. La stessa varietà di abitudini, dovrei dire, perché all'interno della gamma generale di attività delle formiche e delle termiti ci sono varie specializzazioni, che sono state per la massima parte adottate indipendentemente sia dalle termiti sia dalle formiche. Come accade così spesso nel caso dell'evoluzione convergente, le differenze sono non meno rivelatrici delle somiglianze.

Tanto le formiche quanto le termiti vivono in grandi colonie formate per la massima parte da operaie sterili, àttere (senz'ali), al servizio di una produzione efficiente di caste riproduttive alate che prendono il volo per andare a fondare nuove colonie. Una differenza interessante consiste nel fatto che fra le formiche le operaie sono tutte femmine sterili, mentre nelle termiti ci sono maschi sterili e femmine sterili. Sia le colonie di formiche sia le colonie di termiti hanno una «regina» (o a volte più d'una) dal corpo ipertrofico, talvolta (sia nelle formiche sia nelle termiti) in modo grottesco. In entrambi gli insetti il grande gruppo degli operai può comprendere caste specializzate come i soldati. A volte questi sono macchine da combattimento specializzate, spesso dotate di immense mandibole (nel caso delle formiche, e addirittura di artiglierie chimiche nel caso delle termiti), ma sono incapaci di nutrirsi da sé e devono essere nutriti da operai o operaie non guerrieri. Specie particolari di formiche presentano interessanti paralleli con specie particolari di termiti. Per esempio, l'abitudine di coltivare funghi è sorta indipendentemente in formiche (nel Nuovo Mondo) e in termiti (in Africa).

Le formiche (o le termiti) vanno alla ricerca di materiale vegetale che non digeriscono esse stesse ma che trasformano in una composta su cui coltivano funghi, che poi mangiano. Questi funghi, in entrambi i casi, sono specie che non crescono da nessun'altra parte che nel nido, rispettivamente, delle formiche o delle termiti. L'abitudine di coltivare funghi è stata scoperta indipendentemente e in modo convergente (più di una volta) anche da varie specie di coleotteri.

Ci sono convergenze interessanti anche all'interno del gruppo delle formiche. Benché la maggior parte delle colonie di formiche conduca una vita stabile in un nido fisso, pare che altre preferiscano procurarsi i mezzi di sostentamento con un'esistenza nomade, vagando in immense legioni dedite al saccheggio e alle razzie. Le formiche che praticano questo genere di attività vengono chiamate formiche legionarie. Ovviamente tutte le formiche vanno in giro alla ricerca di cibo, ma nella maggior parte delle specie tornano col loro bottino a un nido fisso, nel quale rimangono stabilmente la regina e le larve. Le formiche legionarie sono invece caratterizzate dal fatto di portare con sé nelle loro continue migrazioni le larve e la regina. Le uova e le larve sono trasportate fra le mandibole delle operaie. In Africa il modo di vita legionario è stato sviluppato dalle cosiddette formiche scacciatrici (dorilini). Nell'America centrale e meridionale l'analogo dei dorilini, tanto per le abitudini di vita quanto per l'aspetto, sono gli ecitonini, che però non presentano un particolare rapporto di parentela con essi. Le caratteristiche degli ecitonini si sono sviluppate a quanto pare in modo indipendente per un fenomeno di convergenza.

Tanto le formiche scacciatrici quanto le formiche del genere *Eciton* hanno colonie eccezionalmente estese, le quali possono comprendere fino a un milione di individui, che nel caso delle formiche scacciatrici sale anche sino a 20 milioni. Entrambe presentano fasi di nomadismo che si alternano con fasi sedentarie, accampamenti o «bivacchi» relativamente stabili. Questi due gruppi di formiche, o piuttosto le loro colonie, considerate globalmente come una sorta di unità ameboidi, sono spietati e terribili predatori delle foreste in cui vivono. Tanto i dorilini quanto gli ecitonini fanno a pezzi tutto ciò che incontrano di animale sul loro cammino; gli uni e gli altri hanno suscitato un terrore mistico nei loro paesi. Si dice che gli abitanti dei villaggi di varie parti del Sudamerica

abbandonino i loro villaggi, partendo con armi e bagagli quando un grande esercito di formiche legionarie si sta avvicinando, per tornare quando le legioni sono passate ripulendo il villaggio di tutto, di ogni scarafaggio, ragno e scorpione persino sui tetti di paglia. Ricordo che da bambino in Africa avevo più paura delle formiche scacciatrici che dei leoni o dei coccodrilli. Val la pena di mettere in prospettiva questa terribile fama delle formiche scacciatrici citando le parole di Edward O. Wilson, la principale autorità mondiale sulle formiche, oltre che autore di Sociobiologia: Alla domanda che mi viene posta più spesso sulle formiche, io posso dare la risposta seguente: no, le formiche scacciatrici non sono veramente il terrore della foresta. Benché la colonia di queste formiche sia un «animale» del peso di più di 20 kg e possieda qualcosa come 20 milioni di bocche e aculei e sia senza dubbio la più temibile creazione del mondo degli insetti, essa non è all'altezza delle storie sinistre che si raccontano su di essa. Dopo tutto, lo sciame impiega tre minuti a percorrere un metro circa di terreno. Qualsiasi topo della boscaglia sano, per non parlare di un uomo o di un elefante, può fare un passo di lato e contemplare con suo comodo tutta la frenesia di questo sciame in movimento, un oggetto non tanto minaccioso quanto strano e mirabile, il culmine di una storia evolutiva tanto diversa da quella dei mammiferi quanto è possibile concepirla in questo mondo.

Da adulto a Panama ho fatto un passo di lato e ho contemplato l'equivalente del Nuovo Mondo di quelle formiche scacciatrici che da bambino avevo tanto temuto in Africa - un fiume crepitante che scorreva accanto a me - e posso attestare la stranezza e la meraviglia di quello spettacolo. Un'ora dopo l'altra le legioni continuavano a passare, camminando non solo sul terreno ma anche sul corpo delle compagne mentre io attendevo che comparisse la regina. Infine essa arrivò e la sua era una presenza imponente. Era impossibile vederne il corpo. Si manifestava solo sotto forma di un'onda di frenesia delle operaie, una ribollente palla peristaltica di formiche. La regina si trovava da qualche parte nel mezzo di una palla ribollente di operaie, mentre tutto attorno a essa uno schieramento massiccio di soldati fronteggiava minacciosamente il mondo esterno con le mandibole spalancate, pronti, ciascuno di essi, a uccidere e a morire in difesa della regina. Mi si perdoni la curiosità di vederla: puntolai la palla di operaie con un lungo bastone, in un tentativo vano di far emergere la regina. Immediatamente venti soldati affondarono le vigorose mandibole nel mio bastone, forse per non lasciare più la presa, mentre decine di altri sciamavano su per il bastone, inducendomi ad allontanarmi in gran fretta.

Non riuscii mai a vedere la regina, ma sapevo che da qualche parte, all'interno di quella palla ribollente, c'era lei, la banca dati centrale, il ricettacolo del dna principale dell'intera colonia. Quei soldati con le mandibole spalancate erano pronti a morire per la regina, non perché amassero la loro madre, non perché fossero stati allevati negli ideali del patriottismo, ma semplicemente perché il loro cervello e le loro mandibole erano stati costruiti sulla base delle istruzioni fornite da geni stampati dalla matrice principale contenuta nella regina stessa. Essi si comportavano come soldati coraggiosi perché avevano ereditato i geni di una lunga linea di regine ancestrali la cui vita, e i cui geni, erano stati salvati da soldati coraggiosi quanto loro. I miei soldati avevano ereditato gli stessi geni da quella regina, esattamente come quei vecchi soldati li avevano ereditati dalle regine ancestrali. I miei soldati stavano vigilando sull'originale di quelle stesse istruzioni che inducevano in loro quel comportamento di vigilanza. Essi stavano custodendo il sapere dei loro progenitori, l'Arca dell'Alleanza. Queste strane affermazioni si chiariranno nel capitolo seguente.

Sentii quindi la stranezza, e la meraviglia - non disgiunte dal rinascere di timori semidimenticati - ma trasfigurate e intensificate da una comprensione matura, che mi era mancata quando ero bambino in Africa, degli scopi di quell'intera prestazione. Intensificate, anche, dalla consapevolezza che questa storia delle legioni aveva raggiunto lo stesso culmine nell'evoluzione non una bensì due volte. Queste non erano le formiche scacciatrici dei miei incubi infantili, per quanto simili potessero essere, bensì formiche legionarie del Nuovo Mondo, che avevano con le formiche scacciatrici solo rapporti di parentela molto remoti.

Esse presentavano lo stesso comportamento delle formiche scacciatrici, e per le stesse ragioni. Intanto era scesa la notte e io mi avviai verso casa, ritrovandomi di nuovo bambino e colmo di un senso di timore e di reverenza, ma lieto nel nuovo mondo di comprensione che aveva soppiantato

gli oscuri timori africani.

V

Il potere e gli archivi

Fuori sta piovendo dna. Sulla riva del canale di Oxford, in fondo al mio giardino, ce un grande salice che sta scaricando nell'aria semi coperti di lanugine. Non spira vento, e i semi si propagano dall'albero in tutte le direzioni. Su e giù lungo il canale, a quanto posso vedere col mio binocolo, l'acqua è imbiancata da fiocchi di cotone galleggianti, e possiamo essere certi che essi abbiano ricoperto il terreno anche in altre direzioni per un raggio corrispondente. Quei fiocchi di cotone sono composti per lo più da cellulosa, e occultano al loro interno la minuscola capsula contenente il dna, l'informazione genetica. Il contenuto di dna dev'essere una piccola proporzione del totale; perché dunque ho scritto che sta piovendo dna, anziché cellulosa? La risposta è che quel che importa è il dna. Il fiocco di cellulosa, per quanto grande, è solo un paracadute che, svolta la sua funzione, non serve più. L'intero apparato - cotone, amenti, albero e tutto il resto - è in funzione di una cosa e di una cosa sola: la diffusione del dna nella campagna circostante. Non solo di un dna qualsiasi, ma di un dna i cui caratteri codificati specificano precise istruzioni per la costruzione di salici che produrranno e dissemineranno una nuova generazione di semi coperti di lanugine. Quei fiocchi lanosi stanno letteralmente propagando le istruzioni per produrre copie di se stessi. Essi esistono perché i loro progenitori hanno già avuto successo nel realizzare questo compito. Stanno piovendo istruzioni là fuori; stanno piovendo programmi; stanno piovendo algoritmi contenenti istruzioni sulla crescita degli alberi, sulla propagazione di semi contenuti in soffici batuffoli di cotone. Non è una metafora, è la pura verità.

La cosa non potrebbe essere più evidente se stessero piovendo dei floppy disk.

E una cosa evidente e vera, ma non la si è capita per molto tempo. Alcuni anni fa, se si fosse chiesto a un qualsiasi biologo che cosa ci fosse di speciale nelle cose viventi in contrapposizione a quelle non viventi, egli avrebbe tirato in ballo quasi invariabilmente una speciale sostanza chiamata protoplasma. Il protoplasma non era come una qualsiasi altra sostanza; era vitale, vibrante, palpitante, pulsante, «irritabile» (un modo pedantesco per dire reattivo). Se si fosse preso un corpo vivente e lo si fosse tagliato in pezzetti sempre più piccoli, si sarebbe pervenuti infine a particelle di puro protoplasma. Una volta, nel corso dell'ultimo secolo, un corrispettivo nella vita reale del professor Challenger di Arthur Conan Doyle pensò che il «fango a globigerine» sul fondo del mare fosse protoplasma puro. Quando io andavo a scuola, gli autori anziani di libri di testo scrivevano ancora sul protoplasma anche se a quel tempo, in realtà, avrebbero dovuto essere meglio informati. Oggi questa parola è scomparsa dalla circolazione. Essa è morta, come il flogisto e l'etere universale.

Non c'è niente di speciale nelle sostanze da cui sono composti gli organismi viventi. Questi sono collezioni di molecole, esattamente come ogni altra cosa.

Quel che c'è di speciale in queste molecole è che sono combinate fra loro in modi molto più complessi delle molecole delle cose inanimate, e questo loro modo di combinarsi viene ottenuto seguendo programmi - serie istruzioni su come svilupparsi che gli organismi portano dentro di sé. Esse possono sì vibrare, palpitare e pulsare, possono presentare «irritabilità», e ardere di calore «vivo», ma queste proprietà emergono tutte incidentalmente. Al cuore di ogni cosa vivente non c'è fuoco, non alito caldo, non una «scintilla di vita», bensì informazione, parole, istruzioni. Se si vuole una metafora, non si deve pensare a fuochi e scintille e respiro. Si pensi, invece, a un miliardo di caratteri discreti, digitali, incisi in tavolette di cristallo. Se si vuol comprendere la vita, non si pensi a gel e fanghi vibranti, palpitanti, bensì alla tecnologia dell'informazione. E a questo che accennavo nel capitolo precedente, quando definii la regina come la banca dati centrale.

Il requisito fondamentale per una tecnologia dell'informazione avanzata è una qualche sorta di supporto per la memorizzazione dei dati, con un gran numero di celle o azioni di memoria.

Ogni cella dev'essere in grado di trovarsi in uno di un numero di stati discreto. Questo vale, in ogni

caso, per la tecnologia dell'informazione digitale che domina oggi il nostro mondo artificiale. Esiste anche un tipo alternativo di tecnologia dell'informazione fondato sull'informazione analogica. L'informazione memorizzata su un comune disco grammofonico è analogica.

Essa è registrata in un solco ondulato. L'informazione contenuta sulla superficie di un moderno disco laser (chiamato spesso, purtroppo, compact disc, espressione che non contiene alcuna informazione utile, e che per di più viene di solito pronunciata male, con l'accento sulla prima sillaba) è digitale, è memorizzata in una serie di minuscole buche, ciascuna delle quali o c'è o non c'è: non ci sono vie di mezzo. Questo è il carattere che contraddistingue un sistema digitale: i suoi elementi fondamentali si trovano in uno di due stati alternativi, senza mezze misure o posizioni intermedie o compromessi.

La tecnologia dell'informazione del gene è digitale. Questo fatto fu scoperto da Gregor Mendel nel secolo scorso, anche se egli non si sarebbe certo espresso in questi termini. Mendel dimostrò che i caratteri ereditati dai due genitori non si mescolano ma rimangono disgiunti. Noi riceviamo la nostra eredità in particelle discrete. Per quanto concerne ogni particella, noi la ereditiamo o non la ereditiamo. In realtà, come ha sottolineato R.A. Fisher, uno dei padri fondatori di quello che è noto oggi come neodarwinismo, questo fatto della segregazione dei caratteri ci è sempre rimasto ben accessibile, come dimostra l'esempio del sesso. Noi ereditiamo attributi da un genitore di sesso maschile e da un genitore di sesso femminile, ma ciascuno di noi è maschio o femmina, non ermafrodito. Ogni bambino che nasce ha una probabilità pressa poco uguale di ereditare il sesso maschile o il sesso femminile, ma eredita l'uno o l'altro, non entrambi insieme. Oggi sappiamo che lo stesso vale per ogni particella della nostra eredità. Queste particelle non si mescolano, ma rimangono discrete e separate mentre si combinano e ricombinano lungo le successive generazioni. È vero che gli effetti prodotti dalle unità genetiche sui corpi suscitano spesso un'impressione sorprendente di mescolamento. Se una persona alta si accoppia con una bassa, o una persona nera con una bianca, i loro figli presentano spesso caratteri intermedi. L'apparenza della mescolanza si applica però solo agli effetti sui corpi, ed è dovuta alla somma dei piccoli effetti di grandi numeri di particelle. Le particelle stesse rimangono separate e discrete quando vengono trasmesse alla generazione successiva.

La distinzione fra eredità mista ed eredità particellare ha avuto una grande importanza nella storia delle idee evoluzionistiche. Al tempo di Darwin tutti credevano nell'eredità mista (con l'eccezione di Mendel che, rinchiuso nel suo monastero, fu purtroppo ignorato sino a dopo la sua morte). Un ingegnere scozzese, Fleeming Jenkin, sottolineò che l'eredità mista (la quale veniva considerata allora un dato di fatto) comportava l'insufficienza della selezione naturale come causa dell'evoluzione. Ernst Mayr osserva, piuttosto sgarbatamente, che l'articolo di Jenkin «si fonda su tutti i pregiudizi e fraintendimenti usuali degli scienziati fisici». Darwin fu nondimeno molto preoccupato dal ragionamento di Jenkin. Questo era incorporato nel modo più colorito in una parabola dell'uomo bianco che, in conseguenza di un naufragio, va a finire su un'isola abitata da negri: Concediamogli ogni vantaggio che un bianco possa concepibilmente possedere sui nativi; concediamogli che nella lotta per l'esistenza la sua probabilità di una lunga vita sia molto superiore a quella dei capi nativi; eppure, da tutte queste ammissioni non segue la conclusione che, dopo un numero limitato o illimitato di generazioni, gli abitanti dell'isola saranno bianchi. Il nostro eroe naufragato nell'isola diventerà probabilmente un re; ucciderà molti negri nella lotta per l'esistenza; avrà moltissime mogli e figli, mentre molti fra i suoi sudditi dovranno vivere e morire da scapoli... Le qualità del nostro uomo bianco avranno senza dubbio una parte molto importante nel preservarlo fino a un'età venerabile; eppure non sarebbero sufficienti, in un numero qualsiasi di generazioni, a far diventare bianchi i discendenti dei suoi sudditi... Nella prima generazione ci saranno alcune decine di giovani mulatti intelligenti, molto superiori per intelligenza media ai negri. Possiamo attenderci che per qualche generazione il trono sia occupato da un re più o meno giallo; ma c'è qualcuno che possa credere che l'intera isola acquisterà gradualmente una popolazione bianca o anche solo gialla, o che gli abitanti dell'isola acquisteranno l'energia, il coraggio, l'ingegnosità, la pazienza, l'autocontrollo, la resistenza, in virtù dei quali il nostro eroe uccise un così gran numero dei loro avi, ed ebbe un così gran numero di figli; quelle qualità, in effetti, che la lotta per l'esistenza

selezionerebbe, se potesse selezionare qualcosa?

Non lasciamoci distrarre dagli assunti razzisti della superiorità dell'uomo bianco. Questi assunti erano dati per scontati al tempo di Jenkin e di Darwin come sono dati per scontati oggi gli assunti di valori concernenti la nostra specie: dei diritti umani, della dignità umana e del carattere sacro della vita umana. Noi possiamo riformulare il ragionamento di Jenkin in un'analogia più neutra. Se mescoliamo assieme del colore bianco e del colore nero si ottiene del colore grigio. Se mescoliamo assieme colore grigio e colore grigio, non possiamo ricostruire né il bianco originale né il nero originale. L'esempio della mescolanza dei colori non è molto lontano dalla visione premendeliana dell'eredità, e ancor oggi la cultura popolare esprime spesso l'eredità nei termini di una mescolanza del «sangue». L'argomento di Jenkin è che, al passare delle generazioni, dato l'assunto dell'eredità mista, la variazione è destinata a essere soprafatta, e che infine prevarrà un'uniformità sempre maggiore. Infine la selezione naturale non avrà più alcuna variazione su cui lavorare.

Per quanto quest'argomento debba essere apparso plausibile, esso non è solo un argomento contro la selezione naturale, ma è, in misura ancora maggiore, un argomento contro fatti inevitabili riguardanti l'ereditarietà stessa! È chiaramente falso che la variazione scompaia al passare delle generazioni. Le persone non sono più simili fra loro oggi di quanto fossero al tempo dei loro nonni. La variazione si conserva. C'è un pool di variazione su cui la selezione può continuare a lavorare. Questo fatto fu sottolineato matematicamente nel 1908 da W. Weinberg, e, indipendentemente da lui, dall'eccentrico matematico G.H. Hardy, il quale, per inciso, come è registrato nel libro delle scommesse di un suo (e mio) collega, una volta accettò la scommessa di un collega di «mezzo penny contro tutta la sua fortuna sino alla morte che domani il sole sorgerà». Sarebbero stati però R.A. Fisher e i suoi colleghi, i fondatori della moderna genetica delle popolazioni, a sviluppare la piena risposta a Fleeming Jenkin nei termini della teoria mendeliana della genetica particolare. Questa fu a quel tempo un'ironia perché, come vedremo nel capitolo XI, i principali seguaci di Mendel all'inizio del XX secolo consideravano se stessi come antidarwiniani. Fisher e i suoi colleghi dimostrarono che la selezione darwiniana aveva senso e il problema di Jenkin fu risolto elegantemente nell'ipotesi che quel che variava nell'evoluzione fosse la frequenza relativa di particelle ereditarie discrete, o geni, ciascuno dei quali era presente o assente in qualsiasi particolare individuo. Il darwinismo dopo Fisher si chiama neodarwinismo. La sua natura digitale non è un fatto incidentale, che si trova casualmente a essere valido per la tecnologia dell'informazione genetica. La digitalità è probabilmente una condizione necessaria perché il darwinismo stesso possa funzionare.

Nella nostra tecnologia elettronica le locazioni digitali discrete hanno solo due stati, convenzionalmente espressi come 0 e 1, anche se le si può pensare come alto e basso, acceso e spento, su e giù: tutto quel che importa è che esse debbano essere ben distinte l'una dall'altra, e che i loro stati possano essere «letti», in modo da poter esercitare una qualche influenza su qualcosa. La tecnologia elettronica usa, per memorizzare uno e zero, vari supporti fisici, fra cui dischi magnetici, nastri magnetici, schede e nastri perforati e chip integrati comprendenti al loro interno un gran numero di piccole unità di semiconduttori.

Il principale supporto di memorizzazione all'interno dei semi di salice, delle formiche e di tutte le altre cellule viventi non è elettronico bensì chimico. Esso sfrutta la capacità di certi tipi di molecole di «polimerizzarsi», ossia di unirsi fra loro in lunghe catene di lunghezza indefinita. Esistono moltissimi tipi diversi di polimeri. Il «polietilene», per esempio, è composto da lunghe catene della piccola molecola chiamata etilene: è etilene polimerizzato. L'amido e la cellulosa sono zuccheri polimerizzati.

Alcuni polimeri, invece di essere catene uniformi di una piccola molecola come l'etilene, sono catene di due o più tipi diversi di piccole molecole. Non appena una tale eterogeneità fa il suo ingresso in una catena di polimeri, la tecnologia dell'informazione diventa una possibilità teorica. Se nella catena ci sono due tipi di piccole molecole, queste possono essere concepite rispettivamente come 1 e come 0, fatto che offre immediatamente la possibilità di memorizzare qualsiasi quantità di informazione, di qualsiasi genere, purché la catena sia abbastanza lunga. I particolari polimeri usati dalle cellule viventi sono detti polinucleotidi. Nelle cellule viventi ci sono due principali famiglie di

polinucleotidi, chiamati per brevità dna e rna. Entrambi sono catene di piccole molecole dette nucleotidi. Tanto il dna quanto l'rna sono catene eterogenee, comprendenti quattro tipi diversi di nucleotidi. Proprio in questo fatto risiede, ovviamente, l'opportunità di memorizzare informazione. In luogo dei soli due stati 1 e 0, la tecnologia dell'informazione delle cellule viventi usa quattro stati, che possiamo rappresentare convenzionalmente come A, T, C e G (dai loro nomi: adenina, timina, citosina e guanina). C'è ben poca differenza, in linea di principio, fra una tecnologia dell'informazione binaria a due stati, come la nostra, e una tecnologia dell'informazione a quattro stati, come quella della cellula vivente.

Come ho menzionato alla fine del capitolo I, in una singola cellula umana c'è abbastanza capacità di informazione per immagazzinarvi tre o quattro volte l'intera Encyclopaedia Britannica, con tutti i suoi trenta volumi. Io non conosco la cifra corrispondente per un seme di salice o per una cellula di formica, ma senza dubbio essa sarà dello stesso vertiginoso ordine di grandezza. Nel dna di un singolo seme di giglio o di un singolo spermio di salamandra c'è abbastanza capacità di memoria per memorizzarvi 60 volte l'Encyclopaedia Britannica. Alcune specie di amebe, organismi definiti ingiustamente «primitivi», posseggono nel loro dna una quantità di informazione mille volte maggiore di quella dell'Encyclopaedia Britannica.

Sorprendentemente, pare che in realtà venga usato solo l'1 per cento circa dell'informazione genetica contenuta, per esempio, nelle cellule umane: grosso modo l'equivalente di un solo volume dell'Encyclopaedia Britannica. Nessuno sa quale sia la ragione della presenza del restante 99 per cento. In un libro precedente ho suggerito che potrebbe trattarsi di dna parassitico, che vive a scrocco degli sforzi dell'1 per cento, teoria che più recentemente è stata accettata dai biologi molecolari sotto il nome di «dna egoista». Un batterio ha una capacità di informazione minore di circa un migliaio di volte di quella di una cellula umana, e probabilmente la usa quasi per intero: ce poco spazio per parassiti. Il suo dna potrebbe contenere «solo» una copia del Nuovo Testamento! Gli ingegneri genetici moderni posseggono già la tecnologia per scrivere il Nuovo Testamento o qualsiasi altra cosa nel dna di un batterio. Il «significato» dei simboli in una qualsiasi tecnologia dell'informazione è arbitrario e non c'è alcuna ragione per cui non dovremmo assegnare combinazioni, per esempio triplette, formate con l'alfabeto a quattro lettere del dna, a lettere del nostro alfabeto di 26 lettere (le triplette ottenute con l'alfabeto del dna basterebbero per tutte le lettere maiuscole e minuscole e per 12 segni della punteggiatura). Purtroppo ci vorrebbero cinque secoli-uomo per scrivere il Nuovo Testamento in un batterio, cosicché non penso che qualcuno tenterà di affrontare questo compito. Se qualcuno vorrà mai fare questo tentativo, il ritmo di riproduzione dei batteri è tale che in un singolo giorno si potrebbero tirare 10 milioni di copie del Nuovo Testamento, un sogno per un missionario, se solo la gente sapesse leggere l'alfabeto del dna; purtroppo, però, i caratteri sono così piccoli che tutte le 10 milioni di copie del Nuovo Testamento potrebbero danzare simultaneamente sulla superficie di una capocchia di spillo.

La memoria dei computer elettronici è classificata convenzionalmente in rom e ram. rom sta per memoria «a sola lettura» (Read Only Memory). Più precisamente, si dovrebbe dire memoria «scritta una volta sola, letta molte volte». La sequenza di 0 e di 1 è fissata in essa una volta per tutte al momento della fabbricazione del computer. Essa rimane poi immutata per l'intero periodo di vita della memoria, e le informazioni in essa contenute possono essere lette un numero qualsiasi di volte. L'altra memoria elettronica, detta ram, può essere «scritta» (ci si abitua molto presto a usare questo inelegante gergo dei computer) oltre che letta. La ram può fare perciò tutto ciò che può fare la rom, e anche di più. Il significato della sigla ram è sviante, cosicché non voglio neppure accennarlo. Il punto che ci interessa sulla ram è la possibilità di collocare una qualsiasi sequenza di 1 e di 0 in qualsiasi parte di essa si voglia, tante volte quante si vuole. La massima parte della memoria di un computer è ram. Mentre io sto battendo queste parole, esse entrano direttamente nella ram, e il programma di word-processing, o di elaborazione testi, che controlla questo lavoro è anch'esso nella ram, anche se in teoria potrebbe essere incluso indelebilmente nella rom per non essere mai più modificato in seguito. La rom viene usata per un repertorio fisso di programmi standard di cui ci sia bisogno ripetutamente, e che non si possono cambiare neppure volendolo. Il dna è rom. Esso può essere letto milioni di volte, ma può essere scritto una volta sola: quando

viene composto per la prima volta alla nascita della cellula in cui risiede. Il dna presente nelle cellule di ogni individuo è impresso in esse indelebilmente, e non viene mai modificato nell'intera vita dell'individuo stesso, eccezion fatta per rarissime eventualità di deterioramento casuale. Esso può essere copiato, e in effetti viene duplicato ogni volta che una cellula si divide. La disposizione dei nucleotidi A, T, C e G viene copiata fedelmente nel dna di ciascuna dei tre bilioni di nuove cellule che si formano durante lo sviluppo del bambino. Quando viene concepito un nuovo individuo, nella rom del dna viene impressa in modo indelebile una nuova e unica sequenza di dati, che continuerà a essere associata a lui per tutto il resto della sua vita. Essa viene copiata in tutte le sue cellule somatiche (ossia in tutte le sue cellule tranne quelle riproduttive, nelle quali viene copiata, come vedremo, solo una metà a caso del suo dna).

L'intera memoria del computer, sia essa «rom» o «ram», è indirizzata. Ciò significa che ogni locazione nella memoria ha un'etichetta, di solito un numero, ma questa è una convenzione arbitraria. È importante capire la distinzione fra l'indirizzo e i contenuti di una cella di memoria. Ogni cella o locazione è nota attraverso il suo indirizzo. Per esempio, le prime due lettere del testo di questo capitolo, «Fu», si trovano in questo momento nelle locazioni della ram 6446 e 6447 del mio computer, che ha in tutto 65.536 locazioni ram. In un altro periodo i contenuti di queste due celle di memoria saranno diversi. I contenuti di ogni locazione sono tutto ciò che è stato scritto più recentemente in tale cella di memoria. Anche ogni locazione della rom ha un suo indirizzo e un suo contenuto, con la differenza però che in essa il contenuto di ciascuna cella di memoria è fisso, una volta per tutte.

Il dna è disposto lungo cromosomi in forma di filamenti, simili a lunghi nastri magnetici per computer. Tutto il dna contenuto in ciascuna delle nostre cellule è indirizzato nello stesso senso della rom dei computer, o meglio del nastro magnetico per computer. I numeri o i nomi esatti che usiamo per etichettare un dato indirizzo sono arbitrari, proprio come lo sono per la memoria del computer. Quel che importa è che una particolare locazione nel mio dna corrisponda precisamente a una particolare locazione nel tuo dna: essi hanno lo stesso indirizzo. I contenuti della locazione 321.762 nel mio dna possono essere o non essere uguali a quelli della tua locazione 321.762. Ma la mia locazione 321.762 si trova precisamente nella stessa posizione, nelle mie cellule, della tua locazione 321.762 nelle tue cellule.

Qui «posizione» significa posizione lungo un particolare cromosoma. L'esatta posizione fisica di un cromosoma in una cellula non ha alcuna importanza. Esso fluttua in effetti nel liquido cellulare, così che la sua posizione fisica è soggetta a mutare di continuo, ma ogni posizione lungo il cromosoma ha un indirizzo preciso nei termini di una sequenza ordinata lungo la sua struttura lineare, esattamente come ogni locazione lungo un nastro di computer ha un indirizzo preciso anche se il nastro è sparso sul pavimento anziché essere avvolto ordinatamente sulla bobina. Noi tutti - tutti gli esseri umani - abbiamo la stessa serie di indirizzi del dna, ma non abbiamo necessariamente gli stessi contenuti in quegli indirizzi. Questa è la principale ragione per cui noi siamo tutti diversi l'uno dall'altro.

Altre specie non hanno lo stesso insieme di indirizzi. Gli scimpanzè, per esempio, hanno 48 cromosomi di contro ai nostri 46. A rigore non è possibile confrontare i contenuti indirizzo per indirizzo, perché gli indirizzi non si corrispondono attraverso le barriere di specie. Specie strettamente affini, però, come scimpanzè ed esseri umani, hanno in comune porzioni così grandi di contenuti adiacenti che possiamo identificarli facilmente come fondamentalmente identici, anche se non possiamo usare del tutto lo stesso sistema di indirizzi per le due specie. La cosa che definisce una specie è che tutti i suoi membri hanno lo stesso sistema di indirizzi per il loro dna. A parte qualche rara eccezione, tutti i membri di una specie posseggono lo stesso numero di cromosomi, e ogni locazione lungo un cromosoma ha il suo esatto equivalente nella posizione contrassegnata dallo stesso numero lungo il cromosoma corrispondente in tutti gli altri membri della stessa specie. Quel che può differire fra i membri di una specie sono i contenuti di tali locazioni.

Le differenze di contenuto fra i diversi individui si verificano nella maniera esposta qui' di seguito (e qui devo sottolineare che sto parlando di specie che si riproducono sessualmente come la nostra). I nostri gameti - spermatozoi o ovuli - contengono 23 cromosomi ciascuno. Ogni locazione

indirizzata in un mio spermatozoo corrisponde a una particolare locazione indirizzata in ogni altro dei miei spermatozoi e in ognuno dei tuoi ovuli (o dei tuoi spermatozoi). Tutte le altre mie cellule - le cosiddette cellule somatiche - ne contengono 46, un corredo doppio. Gli stessi indirizzi sono usati due volte in ciascuna di queste cellule. Ogni cellula contiene due cromosomi 9 e due versioni della locazione 7230 lungo il cromosoma 9. Il contenuto delle due locazioni può essere uguale o diverso, esattamente come può essere uguale o diverso in altri membri della specie. Quando uno spermatozoo, con i suoi 23 cromosomi, viene prodotto da una cellula somatica con i suoi 46 cromosomi, esso riceve solo una delle due copie di ogni locazione indirizzata. Quale delle due copie di cromosomi esso riceva può essere considerato un prodotto del caso. Lo stesso vale per gli ovuli. Ne risulta che ogni spermatozoo prodotto e ogni ovulo prodotto sono unici per quanto concerne il contenuto delle loro locazioni, anche se il loro sistema di indirizzi è identico in tutti i membri di una specie (con eccezioni marginali che qui non ci interessano). Quando uno spermatozoo feconda un ovulo, si forma ovviamente un corredo cromosomico diploide completo, e tutte 46 i cromosomi vengono poi duplicati in tutte le cellule dell'embrione in sviluppo.

Ho detto che la rom non può essere scritta se non una volta sola, quando viene prodotta, e questo vale anche per il dna nelle cellule, se si fa eccezione per occasionali errori di copiatura. C'è però un senso in cui si può scrivere costruttivamente nella banca dati collettiva delle rom di un'intera specie. Al passare delle generazioni la sopravvivenza e il successo riproduttivo degli individui all'interno della loro specie - due eventi che non si possono certo definire casuali - «scrivono» nella memoria genetica collettiva della specie istruzioni per la sopravvivenza migliorate. Il mutamento evolutivo in una specie consiste in gran parte in mutamenti, al passare delle generazioni, in tutte le copie che ci sono di ciascuno dei vari possibili contenuti di ciascuna locazione indirizzata del dna. Ovviamente, in ogni tempo particolare, ogni copia deve trovarsi all'interno di un corpo individuale. Quel che importa nell'evoluzione, però, sono i mutamenti nella frequenza di contenuti alternativi possibili in ciascun indirizzo in intere popolazioni. Il sistema di indirizzi rimane lo stesso, ma il profilo statistico dei contenuti delle locazioni muta al passare dei secoli.

In rarissime circostanze cambia anche il sistema di indirizzi stesso. Gli scimpanzè hanno 24 paia di cromosomi e noi ne abbiamo 23. Noi condividiamo un progenitore comune con gli scimpanzè, cosicché a un certo punto, nella nostra linea genealogica o in quella degli scimpanzè, dev'esserci stato un mutamento nel numero dei cromosomi. O noi abbiamo perso un cromosoma (per fusione di due cromosomi) o gli scimpanzè devono averne guadagnato uno (per scissione). A un certo punto dev'esservi stato almeno un individuo che aveva un numero di cromosomi diverso da quello dei suoi genitori. Nell'intero sistema genetico possono verificarsi altri mutamenti occasionali. Interi tratti di codice, come vedremo, possono essere occasionalmente copiati per errore dando cromosomi completamente diversi. Lo sappiamo perché a volte ci accade di trovare, disseminate qua e là nei cromosomi, lunghe sequenze di testo di dna che sono identiche.

Quando, nella memoria di un computer, è stata letta l'informazione contenuta in una particolare cella, a questa informazione può accadere una di due cose diverse. Essa può venire semplicemente scritta in qualche altro posto, o essere coinvolta in qualche «azione». Essere scritta in qualche altro posto significa essere copiata. Abbiamo già visto che il dna viene copiato facilmente da una cellula a un'altra cellula, e che porzioni di dna possono essere copiate da un individuo a un altro individuo, ossia trasmesse in eredità da un genitore al figlio. L'«azione» è più complicata. Nei computer un tipo di azione è l'esecuzione di istruzioni di programmi. Nella rom del mio computer, i numeri di locazione 64.489, 64.490 e 64.491, presi congiuntamente, contengono una particolare sequenza di contenuti - di 1 e di 0 - che, quando vengono interpretati come istruzioni, hanno come conseguenza l'emissione di un suono da parte del piccolo altoparlante del computer. Questa sequenza di bit è 101011010011000011000000. In questa sequenza di bit non c'è niente di intrinsecamente rumoroso, niente che possa dirci che essa avrà quell'effetto sull'altoparlante. Essa ha quell'effetto solo perché il computer è cablato in un certo modo. Analogamente le sequenze nel codice a quattro lettere del dna hanno sì degli effetti, per esempio sul colore degli occhi o sul comportamento, ma questi effetti non sono intrinseci alle sequenze stesse del dna. Esse hanno gli effetti che hanno solo in conseguenza del modo in cui si sviluppa il resto dell'embrione, che a sua volta è influenzato dagli effetti di

sequenze in altre parti del dna. Questa interazione fra geni sarà uno dei temi principali del capitolo VII.

Prima di poter essere coinvolti in qualsiasi sorta di azione, i simboli del codice del dna devono essere tradotti in un altro mezzo. Essi vengono innanzitutto trascritti in simboli rna esattamente corrispondenti. Anche l'rna ha un alfabeto a quattro lettere. A partire dalla loro trascrizione nell'rna, i simboli vengono tradotti in un tipo diverso di polimero, chiamato polipeptide o proteina. Questo potrebbe essere chiamato un poliamminoacido, poiché le sue unità basilari sono amminoacidi. Nelle cellule sono presenti venti tipi di amminoacidi. Tutte le proteine biologiche sono catene composte da questi venti mattoni fondamentali. Benché una proteina sia una catena di amminoacidi, la maggior parte di esse non rimangono lunghe e lineari. Ogni catena si avvolge e ripiega in una forma complicata, la cui precisa pieghettatura viene determinata dall'ordine degli amminoacidi.

La forma spaziale assunta dalla catena, perciò, non varia mai per una sequenza data di amminoacidi. Questa, a sua volta, è determinata con precisione dai simboli del codice in un tratto del dna (attraverso l'rna come intermediario). C'è perciò un senso in cui la forma tridimensionale di una proteina è determinata dalla sequenza lineare di simboli del codice nel dna.

La procedura di traduzione utilizza il famoso «codice genetico» di gruppi di tre lettere. Questo è un dizionario in cui ciascuna delle 64 ($4 \times 4 \times 4$) possibili triplette di simboli di dna (o di rna) è tradotta in uno dei 20 amminoacidi o in uno dei simboli di «arresto di lettura». I segni di punteggiatura (di «arresto di lettura») sono tre. Molti amminoacidi sono codificati da più di una tripletta (come il lettore potrebbe aver congetturato dal fatto che esistono 64 triplette e solo 20 amminoacidi). L'intera traduzione, dalla rom del dna, che è rigorosamente sequenziale, alla forma tridimensionale della proteina, che è esattamente invariante, è un'impresa considerevole di tecnologia dell'informazione digitale. I passi successivi, per mezzo dei quali i geni influiscono sui corpi, sono un po' meno chiaramente simili al funzionamento di computer.

Ogni cellula vivente, persino una singola cellula batterica, può essere concepita come un gigantesco stabilimento chimico.

I tratti di dna, o geni, esercitano i loro effetti influenzando il corso degli eventi nello stabilimento chimico, e lo fanno attraverso la loro influenza sulla forma tridimensionale delle molecole proteiche. L'aggettivo gigantesco può sembrare sorprendente per una cellula, specialmente quando si ricorda che sulla capocchia di uno spillo potrebbero trovare comodamente posto dieci milioni di cellule batteriche. Il lettore ricorderà però anche che ciascuna di queste cellule è capace di contenere l'intero testo del Nuovo Testamento; si tratta, inoltre, di uno stabilimento effettivamente gigantesco se ne valutiamo le dimensioni dal numero delle complesse macchine che contiene. Ogni macchina è una grande molecola proteica, costruita sotto l'influenza di un particolare segmento di dna. Le molecole proteiche chiamate enzimi sono macchine nel senso che ciascuna di esse causa il verificarsi di una particolare reazione chimica. Ogni tipo di macchina proteica sforna in grande quantità il suo particolare prodotto chimico. A questo scopo essa usa materie prime che circolano nella cellula e che sono, molto probabilmente, il prodotto di altre macchine proteiche. Per farsi un'idea delle dimensioni di queste macchine, ciascuna di esse è composta da circa 6000 atomi, che è un numero abbastanza grande rispetto alle proporzioni normali di una molecola. In una cellula ci sono un milione circa di queste grandi apparecchiature, le quali sono presenti inoltre in più di 2000 tipi specializzati diversi, a ciascuno dei quali è affidata una particolare operazione in quello stabilimento chimico che è appunto la cellula. Sono i prodotti chimici Caratteristici di tali enzimi a dare alla cellula la sua forma e il suo comportamento specifici.

Poiché tutte le cellule somatiche contengono gli stessi geni, può sembrare sorprendente che esse non siano tutte uguali. Le differenze dipendono dal fatto che in ogni tipo di cellula viene letto un sottoinsieme diverso di geni, mentre gli altri vengono ignorati. Nelle cellule epatiche non vengono lette quelle parti della rom del dna che sono specificamente pertinenti alla costruzione delle cellule dei reni, e viceversa. La forma e il comportamento di una cellula dipendono da quali geni al suo interno vengano letti e tradotti nei loro prodotti proteici. Questa scelta dipende dalle sostanze chimiche già presenti nella cellula, le quali dipendono a loro volta da quali geni sono già stati letti in precedenza nella cellula e in parte in cellule vicine.

Quando una cellula si divide in due, le due cellule figlie non sono necessariamente uguali fra loro. Nell'ovulo fecondato originario, per esempio, certe sostanze chimiche si raccolgono a un estremo della cellula, mentre altre sostanze si riuniscono all'altro estremo. Quando una tale cellula polarizzata si divide, le due cellule figlie ricevono diverse assegnazioni chimiche. Ciò significa che nelle due cellule figlie verranno letti geni diversi, e si instaura una sorta di differenza autorinforzantesi. La forma finale del corpo nella sua totalità, le dimensioni degli arti, il cablaggio del cervello, i tempi in cui compaiono i vari repertori di comportamento, sono altrettante conseguenze indirette di interazioni fra tipi diversi di cellule, le cui differenze, a loro volta, derivano dalla lettura di geni diversi. Si possono concepire nel modo migliore questi processi divergenti come localmente autonomi, al modo della procedura «ricorsiva» del capitolo III, piuttosto che come coordinati in un qualche grande disegno centrale.

L'«azione», nel senso in cui uso il termine in questo capitolo, è ciò di cui parla un genetista quando menziona l'«effetto fenotipico» di un gene. Il dna ha effetti sui corpi, sul colore degli occhi, sulla forma dei capelli, sull'intensità del comportamento aggressivo e su migliaia di altri attributi, i quali sono chiamati tutti effetti fenotipici. All'inizio il dna esercita questi effetti localmente, dopo essere stato letto dall'rna ed essere stato tradotto in catene proteiche, cosa che incide poi sulla forma e sul comportamento delle cellule. Questo è uno dei due modi in cui si può leggere l'informazione nella struttura del dna. L'altro modo consiste nella sua duplicazione in un nuovo filamento di dna. Questa è la copiatura di cui abbiamo già parlato in precedenza.

Esiste una distinzione fondamentale fra queste due vie di trasmissione dell'informazione contenuta nel dna, fra la trasmissione verticale e quella orizzontale. L'informazione viene trasmessa verticalmente ad altro dna nelle cellule (che producono altre cellule) che producono spermatozoi o ovuli. Di qui essa viene trasmessa verticalmente alla successiva generazione e poi, ancora verticalmente, a un numero indefinito di future generazioni. Parlerò in questo caso di «dna d'archivio». Esso è potenzialmente immortale. La sequenza delle cellule lungo cui si propaga il dna d'archivio è chiamata linea germinale. La linea germinale è quell'insieme di cellule, all'interno di un corpo, che è ancestrale agli spermatozoi o agli ovuli ed è quindi ancestrale a future generazioni. Il dna viene trasmesso anche lateralmente o orizzontalmente: al dna in cellule non appartenenti alla linea germinale, come le cellule epatiche o le cellule della pelle; all'interno di tali cellule all'rna, di qui alla proteina, esercitando in tal modo vari effetti sullo sviluppo embrionale e perciò sulla forma e sul comportamento dell'adulto. Possiamo concepire la trasmissione orizzontale e la trasmissione verticale come corrispondenti ai due sottoprogrammi chiamati sviluppo e riproduzione di cui ci siamo occupati nel capitolo III.

La selezione naturale concerne il successo differenziale dei vari dna rivàli nel riuscire a farsi trasmettere verticalmente negli archivi della specie, «dna rivàli» significa contenuti alternativi di particolari indirizzi nei cromosomi della specie. Alcuni geni hanno più successo di geni rivàli nel restare negli archivi. Benché il significato del «successo» consista in definitiva nella trasmissione verticale negli archivi della specie, il criterio per il successo è normalmente l'azione che i geni hanno sui corpi, per mezzo della loro trasmissione laterale. Anche in questo caso ci troviamo in una situazione corrispondente a quella che abbiamo visto nel modello dei biomorfi. Supponiamo, per esempio, che nelle tigri ci sia un gene particolare che, per mezzo della sua influenza laterale in cellule della mandibola, fa sì che i denti siano un po' più aguzzi di come sarebbero se fossero cresciuti sotto l'influenza di un gene rivàle. Una tigre con denti eccezionalmente aguzzi potrà uccidere prede con più efficienza di una tigre normale; essa avrà perciò un maggior numero di figli, e quindi trasmetterà, verticalmente, un numero maggiore di copie del gene che produce denti aguzzi. Essa trasmetterà nello stesso tempo, ovviamente, anche tutti gli altri suoi geni, ma solo lo specifico «gene dei denti aguzzi» si troverà, in media, nel corpo delle tigri dai denti aguzzi. Il gene stesso beneficerà, nella sua trasmissione verticale, degli effetti medi che esercita su un'intera serie di corpi.

Gli effetti del dna come supporto d'archivio sono spettacolari.

Nella sua capacità di conservare un messaggio, esso supera di gran lunga le tavolette di pietra.

Bovini e piante di piselli (come, del resto, anche noi tutti) hanno un gene quasi identico noto come

il gene istone H4. Il suo testo in dna ha una lunghezza di 306 caratteri. Noi non possiamo dire che esso occupi gli stessi indirizzi in tutte le specie perché non possiamo confrontare le etichette di indirizzo fra specie diverse. Possiamo dire però che nei bovini c'è un tratto di 306 caratteri che è virtualmente identico a un tratto di 306 caratteri nei piselli. Bovini e piselli differiscono fra loro in soli due caratteri di questi 306. Noi non sappiamo esattamente quanto tempo fa sia vissuto l'antenato comune dei bovini e dei piselli, ma la documentazione fossile ci induce a pensare che sia stato in una qualche epoca compresa fra uno e due miliardi di anni fa. Poniamo 1,5 miliardi di anni fa. In questo tempo inimmaginabilmente lungo (per gli esseri umani), ciascuna delle due linee genealogiche ramificatesi da quel remoto progenitore ha conservato 305 su 306 caratteri (in media: può anche darsi che una delle due linee genealogiche li abbia conservati tutte 306 e che l'altra ne abbia conservati 304).

Le lettere incise sulle lapidi tombali diventano illeggibili in poche centinaia di anni.

In un certo senso la conservazione del documento di dna costituito dall'istone H4 è ancora più impressionante perché, diversamente che nel caso delle tavolette di pietra, non è la medesima struttura fisica a durare e a conservare il testo. Questo viene ripetutamente copiato e ricopiato al passare delle generazioni, come le scritture ebraiche che venivano trascritte ritualmente da scribi ogni 80 anni per prevenirne l'usura. È difficile stimare esattamente quante volte il documento istone H4 sia stato ricopiato nella linea genealogica che va dai bovini domestici al progenitore comune con i piselli, ma siamo probabilmente vicini a 20 miliardi di volte. È difficile anche trovare una misura con cui comparare la conservazione di più del 99 per cento dell'informazione in 20 miliardi di successive copiatore.

Possiamo tentare di usare una versione del gioco del «telefono senza fili», che era in voga al tempo delle nostre nonne. Immaginiamo che 20 miliardi di dattilografe siano sedute l'una accanto all'altra. La linea delle dattilografe si avvolgerebbe attorno alla Terra 500 volte. La prima dattilografa scrive una pagina di un documento e la trasmette alla sua vicina. Questa la copia e trasmette la sua copia alla dattilografa successiva. Questa ribatte a sua volta il documento e lo passa alla dattilografa seguente, e così via di seguito. Il messaggio raggiunge infine il termine della linea e noi possiamo leggerlo (a leggerlo saranno in realtà i nostri dodicimillesimi bisnipoti, supponendo che tutte le dattilografe abbiano la velocità tipica di una buona segretaria). Quanto sarebbe fedele la resa del messaggio originale?

Per rispondere a questa domanda dobbiamo fare qualche assunto sulla precisione delle dattilografe. Rovesciamo la domanda e chiediamoci: quanto dovrebbe essere brava ogni dattilografa per poter eguagliare la prestazione del dna? La risposta è quasi troppo comica perché valga la pena di esprimerla. Per quel che può valere, diciamo però che ogni dattilografa dovrebbe avere una frequenza di errore di circa uno su mille miliardi; in altri termini, dovrebbe essere così precisa da fare un solo errore di battitura nel copiare 250.000 volte la Bibbia. Nella vita reale una buona segretaria ha una frequenza di errore di circa uno per pagina: una frequenza circa mezzo miliardo di volte maggiore di quella del gene istone H4. Una linea di segretarie ridurrebbe un testo al 99 per cento delle sue lettere originali al ventesimo membro della linea di 20 miliardi di segretarie. Al 10.000° membro della linea sopravviverebbe meno dell'1 per cento del testo originario. Questo punto di degradazione quasi totale sarebbe raggiunto prima che il 99,9995 per cento delle dattilografe avessero mai avuto l'opportunità di vedere il testo.

Questa comparazione è stata in realtà un po' truffaldina, ma sotto un aspetto interessante e rivelatore. Essa suggerisce che quelli che stiamo misurando siano solo errori di copiatura. Il documento costituito dall'istone H4 non è stato però solo copiato bensì è stato anche sottoposto alla selezione naturale. Istone ha un'importanza vitale per la sopravvivenza. Esso è usato nell'ingegneria strutturale dei cromosomi. Può darsi che nella copiatura del gene istone H4 si sia verificato un numero di errori molto maggiore, ma gli organismi mutanti non sopravvissero, o almeno non si riprodussero. Per rendere più equo il confronto, dovremmo supporre che nella sedia di ogni dattilografa fosse incorporato un fucile, collegato in modo tale che la dattilografa colpevole di un errore venisse sommariamente fucilata, e che il suo posto venisse preso da una dattilografa di riserva (i lettori dallo stomaco delicato preferirebbero immaginare forse un sedile eiettabile a molla

che si limitasse a catapultare fuori del loro posto nella linea delle segretarie le dattilografe non all'altezza del compito, ma il fucile ci dà un quadro più realistico del modo di operare della selezione naturale).

Questo metodo per misurare la capacità di conservazione del dna attraverso il numero dei mutamenti che si sono realmente verificati durante il tempo geologico combina dunque una genuina fedeltà nella copiatura con gli effetti di filtro della selezione naturale. Noi siamo solo i discendenti di mutamenti del dna che hanno avuto successo. Quelli che conducevano alla morte non si sono evidentemente conservati. Possiamo misurare la fedeltà di copiatura reale, prima che la selezione naturale cominci a lavorare su ciascuna nuova generazione di geni? Sì, questo valore è l'inverso della cosiddetta frequenza di mutazione, e può essere misurato. La probabilità che una qualsiasi lettera particolare venga copiata male in ogni ricopiatura del documento risulta essere di un po' più di uno su un miliardo. La differenza fra la frequenza di mutazione, così misurata, e la frequenza inferiore con cui il mutamento è stato realmente incorporato nel gene istone nel corso dell'evoluzione, è una misura dell'efficacia della selezione naturale nel preservare quest'antico documento.

Il conservatorismo del gene istone nel corso di miliardi di anni è eccezionale se commisurato a criteri genetici. Altri geni mutano con frequenze maggiori, presumibilmente perché la selezione naturale è più tollerante verso le variazioni che si verificano in essi.

Per esempio, i geni che codificano le proteine note come fibrinopeptidi mutano nell'evoluzione con una frequenza che è prossima al ritmo di mutazione di base. Ciò significa probabilmente che errori nei particolari di queste proteine (che si producono durante la coagulazione del sangue) non hanno molta importanza per l'organismo. I geni dell'emoglobina hanno una frequenza di mutamento che è intermedia fra quella degli istoni e quella dei fibrinopeptidi. E presumibile che la selezione naturale abbia una tolleranza intermedia verso i loro errori. L'emoglobina compie un lavoro importante nel sangue e i suoi particolari strutturali hanno perciò grande rilevanza; pare però che diverse varianti alternative abbiano la capacità di svolgere il lavoro altrettanto bene.

Queste considerazioni sembrano un po' paradossali, finché non riflettiamo un po' di più sull'argomento. Le molecole a evoluzione più lenta, come gli istoni, risultano essere quelle che sono state più soggette alla selezione naturale. I fibrinopeptidi sono le molecole che si evolvono più rapidamente perché la selezione naturale le ignora quasi del tutto. Esse sono libere di evolversi con la frequenza delle mutazioni. La ragione per cui questo fatto sembra paradossale è che noi poniamo molto l'accento sulla selezione naturale come forza motrice dell'evoluzione. Senza selezione naturale possiamo attenderci perciò che non ci sarebbe evoluzione. Inversamente, potremmo essere perdonati se pensiamo che una forte «pressione selettiva» conduca a una rapida evoluzione. Quel che troviamo, invece, è che la selezione naturale esercita un effetto di freno sull'evoluzione. La rapidità di base dell'evoluzione, in assenza della selezione naturale, è la massima rapidità possibile. Questa rapidità coincide con la frequenza di mutazione.

Questa situazione non è in realtà paradossale. Se vi riflettiamo un po', vediamo che non potrebbe essere altrimenti. L'evoluzione per selezione naturale non potrebbe essere più rapida della frequenza delle mutazioni poiché la mutazione è, in ultima analisi, l'unico modo in cui nuove variazioni entrano nelle specie. Tutto quel che la selezione naturale può fare è di accettare certe nuove varianti e rifiutarne altre. La frequenza di mutazione è destinata a fissare un limite superiore alla rapidità con cui l'evoluzione può procedere. In effetti, la selezione naturale si occupa più di impedire il mutamento evolutivo che di promuoverlo attivamente. Ciò non significa, mi affretto a insistere, che la selezione naturale sia un processo puramente distruttivo. Essa può anche costruire, in modi che saranno spiegati nel capitolo VII.

Anche la frequenza di mutazione di per sé è molto lenta. Questo è un altro modo per dire che, persino in assenza della selezione naturale, la precisione con cui il codice del dna lavora a conservare il suo archivio è davvero impressionante. Una stima prudente ci dice che, in assenza della selezione naturale, il dna si replica con tanta precisione che occorrono cinque milioni di generazioni per accumulare un errore dell'1 per cento nella copiatura. Le nostre ipotetiche dattilografe sono ancora surclassate senza speranza dal dna, anche in assenza della selezione

naturale. Per uguagliare il livello di precisione del dna senza l'azione correttiva della selezione naturale, le dattilografe dovrebbero essere in grado di battere a macchina ciascuna l'intero Nuovo Testamento con un solo errore. In altri termini, esse dovrebbero essere circa 450 volte più precise di una segretaria tipica della vita reale. Questa cifra è ovviamente molto inferiore a quella di mezzo miliardo, che è il fattore di cui il gene istone H4 dopo la selezione naturale è più preciso di una segretaria tipica, ma è una cifra che fa ancora molto effetto.

Sono stato però ingiusto nei confronti delle dattilografe, supponendo implicitamente che esse non siano in grado di accorgersi dei loro errori e di correggerli. Ho supposto una totale assenza di rilettura. In realtà le dattilografe, dopo aver battuto a macchina un testo, lo rileggono. La mia schiera di miliardi di dattilografe non determinerebbe perciò una degenerazione del messaggio originario nel modo semplice da me descritto. Il meccanismo di copiatura del dna opera automaticamente lo stesso tipo di correzione degli errori. Se non lo facesse, non riuscirebbe certo a conseguire la stupenda precisione da me descritta. La procedura di copiatura del dna comprende varie riletture dei testi. La rilettura è tanto più necessaria in quanto le lettere del codice del dna non sono affatto statiche, come geroglifici incisi nel granito. Al contrario, le molecole che hanno parte in questo processo sono così piccole - si ricordino tutte quelle copie del Nuovo Testamento sistemate sulla capocchia di uno spillo - da essere soggette a un assalto costante da parte della consueta agitazione termica delle molecole. C'è un flusso costante, un ricambio di lettere nel messaggio. Circa 5000 lettere del dna degenerano ogni giorno in ogni cellula umana e sono sostituite immediatamente per opera dei meccanismi di riparazione. Se i meccanismi di riparazione non fossero costantemente all'opera, il messaggio si dissolverebbe costantemente. La rilettura del testo appena copiato è solo un caso speciale del normale lavoro di riparazione. È soprattutto alla lettura di bozze che si deve la notevole accuratezza e fedeltà del dna nella memorizzazione dell'informazione. Abbiamo visto che le molecole di dna sono al centro di una spettacolare tecnologia dell'informazione. Esse sono capaci di memorizzare una quantità immensa di informazione digitale precisa in uno spazio molto piccolo; e sono capaci di conservare quest'informazione - con un numero di errori sorprendentemente modesto, ma nondimeno ancora con qualche errore per un tempo molto lungo, misurato in milioni di anni. Dove ci conducono questi fatti? Essi ci conducono nella direzione di una verità centrale della vita sulla Terra, la verità cui io accennai nel mio paragrafo di apertura sui semi del salice. Questa verità è che gli organismi viventi esistono a vantaggio del dna piuttosto che l'inverso. Quest'affermazione non sarà a questo punto ancora ovvia, ma spero di riuscire quanto prima a convincere il lettore. I messaggi contenuti nelle molecole del dna sono quasi eterni quando vengano visti in rapporto alla scala temporale della vita dell'individuo. La durata di vita dei messaggi del dna (a prescindere da poche sporadiche mutazioni) viene misurata in unità comprese fra milioni di anni e centinaia di milioni di anni; o, in altri termini, da 10.000 a un bilione di vite di singoli individui. Ogni singolo organismo dovrebbe essere visto come un veicolo temporaneo in cui i messaggi del dna spendono una minuscola frazione della loro durata di vita geologica.

Il mondo è pieno di cose che esistono...! Ammesso questo, esso ci sta conducendo da qualche parte? Le cose esistono o perché hanno avuto origine recentemente o perché hanno qualità che ne hanno reso improbabile la distruzione in passato. Le pietre non vengono all'esistenza con una frequenza elevata ma, una volta che esistono, sono dure e durevoli. Se non lo fossero non sarebbero pietre bensì sabbia. Alcune pietre, in effetti, sono sabbia, ed ecco perché esistono le spiagge! Sono quelle che hanno proprietà di durata a esistere come pietre. Le gocce di rugiada, invece, esistono non perché siano durevoli ma perché sono appena venute all'esistenza e non hanno ancora avuto il tempo di evaporare. Pare dunque che ci siano due modi di «capacità esistenziale»: quello della goccia di rugiada, che può essere definito come un'«elevata probabilità di venire all'esistenza ma non accompagnata da una grande durevolezza», e quello delle pietre, che può essere definito come «privo di un'elevata probabilità di venire all'esistenza ma dotato della capacità di durare per molto tempo una volta che esse abbiano avuto origine». Le pietre hanno una grande durata e la rugiada una elevata «generabilità». (Mi sono sforzato di trovare una parola meno brutta ma non ci sono riuscito.)

Il dna possiede il meglio dei due mondi. Le molecole di dna stesse, in quanto entità fisiche, sono simili alle gocce di rugiada.

In presenza di condizioni favorevoli hanno origine con una grande frequenza, ma nessuna di esse è mai esistita a lungo, e sono tutte destinate ad andar distrutte in capo a pochi mesi. Esse non sono durevoli come pietre. Ma le configurazioni che esse portano nelle loro sequenze sono durevoli quanto le pietre più dure. Esse hanno ciò che si richiede per esistere per milioni di anni, ed ecco perché esistono ancor oggi. La differenza essenziale rispetto alle gocce di rugiada è che le nuove gocce di rugiada non vengono generate dalle vecchie gocce di rugiada. Le gocce di rugiada assomigliano senza dubbio ad altre gocce di rugiada, ma non assomigliano specificamente alle gocce di rugiada loro «genitrici». A differenza delle molecole di dna, non formano linee genealogiche e perciò non possono trasmettere messaggi. Le gocce di rugiada vengono all'esistenza per generazione spontanea, i messaggi del dna per duplicazione.

Verità lapalissiane come «il mondo è pieno di cose che hanno quel che si richiede per essere al mondo» sono banali, quasi sciocche, finché non perveniamo ad applicarle a una sorta speciale di durevolezza, quella nella forma di linee genealogiche di copie multiple. I messaggi del dna hanno una diversa sorta di durevolezza rispetto a quella delle pietre, e un tipo di generabilità diverso da quello delle goccioline di rugiada. Per le molecole di dna «quel che si richiede per essere al mondo» viene ad assumere un significato tutt'altro che ovvio e tautologico. «Quel che si richiede per essere al mondo» risulta comprendere la capacità di costruire macchine come voi e me, le cose più complicate che esistano nell'universo conosciuto. Vediamo in che modo ciò possa accadere. Fondamentalmente, la ragione è che le proprietà del dna da noi identificate risultano essere gli ingredienti basilari necessari per qualsiasi processo di selezione cumulativa. Nei modelli presentati nel capitolo III abbiamo introdotto deliberatamente nel computer gli ingredienti basilari della selezione cumulativa.

Perché una selezione cumulativa possa verificarsi realmente nel mondo, devono già avere avuto origine alcune entità le cui proprietà costituiscono quegli ingredienti basilari. Consideriamo, ora, quali siano tali ingredienti. Nel fare questo, dobbiamo tenere a mente che quegli stessi ingredienti, almeno in qualche forma rudimentale, devono avere avuto origine spontaneamente sulla Terra primitiva, giacché in caso contrario la selezione cumulativa, e perciò la vita, non avrebbero mai avuto origine. Non sto riferendomi qui specificatamente al dna, bensì a quegli ingredienti basilari che si richiedono perché la vita possa avere origine da qualche parte nell'universo.

Quando il profeta Ezechiele si trovava nella valle piena di ossa, profetizzò su di esse e ordinò loro di unirsi assieme. Allora le ossa si accostarono fra loro e su di esse cominciarono a formarsi muscoli e carne. Ma in esse non c'era ancora spirito alcuno.

Mancava ancora l'ingrediente vitale, l'ingrediente della vita. Un pianeta privo di vita ha atomi, molecole e masse maggiori di materia, che si urtano e si stringono fra loro a caso, secondo le leggi della fisica. A volte le leggi della fisica fanno unire gli atomi e le molecole come le ossa disseccate alle quali parlava Ezechiele, altre volte li fanno dividere. Può accadere che si formino aggregazioni di atomi abbastanza grandi, le quali possono poi tornare a frantumarsi e a dividersi. Ma in esse non c'è ancora il soffio della vita.

Ezechiele invocò allora lo spirito, che venisse dai quattro venti a infondere la vita nelle ossa secche. Qual è l'ingrediente vitale che un pianeta privo di vita, simile alla Terra primitiva, deve possedere per avere qualche probabilità di diventare un pianeta vivo, come accadde un tempo alla Terra? Non è lo spirito, non il vento, non una qualsiasi sorta di elisir o di pozione. Non è affatto una sostanza, è una proprietà, la proprietà dell'autoduplicazione. Questo è l'ingrediente basilare della selezione cumulativa. In qualche modo, per effetto delle leggi comuni della fisica, devono venire all'essere delle entità capaci di copiare se stesse o, come le chiamerò io, dei replicatori. Nella vita moderna questo ruolo è assolto, quasi per intero, da molecole di dna, ma potrebbe essere assolto da qualsiasi cosa di cui fosse possibile far copie. Possiamo sospettare che i primi replicatori sulla Terra primitiva non fossero molecole di dna. È improbabile che una molecola di dna pienamente sviluppata possa avere origine senza l'aiuto di altre molecole che esistono normalmente solo in cellule vive. I primi replicatori furono probabilmente più rozzi e più semplici del dna.

Ci sono altri due ingredienti necessari, i quali avranno origine normalmente dal primo ingrediente, l'autoduplicazione stessa. Nell'autocopiatura devono verificarsi inevitabilmente errori occasionali; persino il sistema del dna va soggetto a errori, anche se molto di rado, e pare probabile che i primi replicatori sulla Terra siano stati molto più irregolari. Almeno qualcuno fra i replicatori dovrebbe essere in grado di esercitare un qualche potere sul proprio futuro. Quest'ultimo ingrediente suona più minaccioso di quanto non sia in realtà. Tutto ciò che esso significa è che qualche proprietà dei replicatori dovrebbe esercitare un'influenza sulla propria probabilità di venire replicata. Almeno in una forma rudimentale, è probabile che questa sia una conseguenza inevitabile dei fatti fondamentali dell'autoduplicazione stessa.

Ogni replicatore, quindi, causa la formazione di copie di se stesso. Ogni copia è uguale all'originale, e ha le stesse proprietà dell'originale. Fra queste proprietà c'è ovviamente quella di fare (con errori occasionali) altre copie di se stessi. Ogni replicatore è quindi potenzialmente «progenitore» di una linea indefinitamente lunga di replicatori discendenti, i quali si estendono in un futuro lontano e si ramificano a produrre, potenzialmente, un numero estremamente grande di replicatori discendenti. Ogni nuova copia dev'essere prodotta a partire da materie prime, da blocchi di costruzione più piccoli che vagano qua e là. È presumibile che i replicatori operino come una qualche sorta di stampo. I componenti più piccoli si riuniscono nello stampo in modo tale da formare un duplicato dello stampo stesso. Poi il duplicato si stacca dallo stampo e acquista la capacità di agire da stampo a sua volta. Noi abbiamo quindi una popolazione potenzialmente crescente di replicatori. La popolazione non crescerà indefinitamente, poiché infine diventerà limitante la disponibilità di materie prime, gli elementi più piccoli che entrano negli stampi.

Introduciamo ora nel discorso il nostro secondo ingrediente.

A volte la copiatura non sarà perfetta. Si verificheranno errori.

La possibilità di errori non potrà mai essere eliminata del tutto da alcun processo di copiatura, anche se la loro probabilità potrà essere ridotta a bassi livelli. È l'obiettivo verso cui mirano di continuo i produttori di apparecchiature ad alta fedeltà, e il processo di duplicazione del dna, come abbiamo visto, ha un'efficacia spettacolare nell'eliminazione degli errori. Ma la duplicazione moderna del dna è un processo di alta tecnologia, con tecniche complesse di rilettura o «correzione di bozze» che sono state perfezionate nel corso di molte generazioni di selezione cumulativa. I primi replicatori, come abbiamo già detto, furono probabilmente, al confronto, aggeggi piuttosto rozzi, a bassa fedeltà.

Torniamo ora alla nostra popolazione di replicatori, e vediamo quale possa essere l'effetto di una copiatura con una certa quantità di errori. È chiaro che, anziché avere una popolazione uniforme di replicatori identici, avremo una popolazione mista.

Probabilmente troveremo che molti fra i prodotti di una copiatura con errori avranno perduto la proprietà di autoduplicarsi che avevano i loro «genitori». Alcuni conserveranno invece la capacità dell'autoduplicazione, differendo dai loro genitori sotto qualche altro aspetto. Avremo in questo modo degli errori che verranno duplicati nella popolazione.

Quando il lettore legge la parola «errore», deve cancellare dalla sua mente qualsiasi connotazione peggiorativa. Questa parola significa semplicemente un errore dal punto di vista della riproduzione ad alta fedeltà. Può anche capitare che un errore di copiatura dia origine a un miglioramento. Oso dire che molti nuovi piatti deliziosi hanno avuto origine dall'errore di un cuoco nel seguire una ricetta. Nella misura in cui posso sostenere di avere avuto idee scientifiche originali, queste hanno avuto origine talvolta da fraintendimenti, o cattiva lettura, delle idee di altri. Per tornare ai nostri replicatori primordiali, mentre la maggior parte degli errori di copiatura hanno avuto probabilmente come conseguenza una diminuita efficacia di copiatura, o una perdita totale della proprietà di autocopiatura, alcuni potrebbero essere risultati migliori nell'autoduplicazione del genitore replicatore che diede loro origine.

Che cosa significa «migliore»? In ultima analisi significa più efficiente nell'autoduplicazione, ma che cosa potrebbe significare ciò in pratica? Questo interrogativo ci conduce al nostro terzo «ingrediente». L'ho menzionato poco fa come «potere» e fra poco vedremo perché. Quando abbiamo parlato della duplicazione come di un processo di produzione per mezzo di uno stampo,

abbiamo visto che l'ultimo passo in questo processo dev'essere il distacco della nuova copia dallo stampo. Il tempo richiesto dal distacco dallo stampo può essere influenzato da una proprietà che chiamerò la «adesività» del vecchio stampo.

Supponiamo che nella nostra popolazione di replicatori, la quale è molto varia a causa di vecchi errori di copiatura avvenuti anche in tempi remoti fra i nostri «ascendenti», alcune varietà si rivelino più adesive di altre. Una varietà molto adesiva rimane appiccicata a ogni nuova copia per un tempo medio di più di un'ora prima di staccarsi finalmente e poter dare origine a un nuovo processo. Una varietà meno viscosa consente il distacco di ogni nuova copia entro una frazione di secondo dopo la sua formazione. Quale di queste due varietà verrà a predominare nella popolazione di replicatori? Non c'è alcun dubbio sulla risposta. Se questa è l'unica proprietà per cui le due varietà differiscono, quella adesiva è destinata a diventare molto meno numerosa nella popolazione. La varietà non adesiva sforna copie non adesive a un ritmo migliaia di volte superiore a quello con cui quella adesiva forma copie adesive. Le varietà di adesività intermedia avranno frequenze di autoprogrammazione intermedie. Ci sarà quindi una «tendenza evolutiva» verso una ridotta adesività.

Qualcosa di simile a questa sorta di selezione naturale elementare è stato duplicato in provetta.

Esiste un virus detto Qbeta che vive come parassita del batterio intestinale *Escherichia coli*. Il Q-beta non ha dna, ma contiene un singolo filamento della molecola affine rna, e anzi consta in gran parte di tale molecola. L'rna è capace di duplicarsi in modo simile al dna.

Nella cellula normale, le molecole proteiche vengono montate secondo i piani di istruzioni contenuti nell'rna. Questi sono copie di lavoro di piani stampati a partire dalle matrici originali del dna, contenute nei preziosi archivi della cellula. È però teoricamente possibile costruire una speciale macchina - una molecola proteica come il resto delle macchine cellulari - che stampa copie di rna a partire da altre copie di rna. Tale macchina è chiamata molecola di rna-replicasi. La cellula batterica stessa non usa normalmente queste macchine e neppure ne costruisce. Ma poiché la replicasi è soltanto una molecola come qualsiasi altra, le versatili macchine della cellula batterica che costruiscono proteine possono facilmente passare alla sua produzione, esattamente come le macchine utensili in una fabbrica di automobili possono facilmente, in tempo di guerra, essere convertite alla produzione di munizioni: tutto ciò di cui hanno bisogno è di ricevere i giusti progetti. È a questo punto che entra in scena il virus.

La parte attiva del virus è un piano di rna. Superficialmente, questo piano è indistinguibile da qualunque altro dei progetti dell'rna che fluttuano tutto attorno dopo essere stati stampati a partire dalla matrice originale del dna del batterio. Se però leggiamo la piccola stampa dell'rna virale, vi troviamo scritto qualcosa di diabolico. Le lettere specificano un piano per la produzione di rna-replicasi: per produrre macchine che producano altre copie dei medesimi piani dell'rna, i quali verranno usati per produrre altre macchine che produrranno altre copie dei piani, utilizzati a loro volta per sfornare altre macchine...

La fabbrica è quindi ingannata da questi progetti che lavorano per fini egoistici. In un certo senso essa stava chiedendo a gran voce di essere ingannata. Se riempiamo una fabbrica di macchine così perfezionate da essere in grado di realizzare qualsiasi cosa che sia contenuta nei progetti, non sorprende se prima o poi emergerà un progetto che induca queste macchine a produrre copie di se stesse. La fabbrica si riempirà sempre più di queste macchine truffaldine, ciascuna delle quali sfornerà progetti truffaldini per produrre macchine che saranno in grado di fare copie di se stesse. Infine, lo sfortunato batterio scoppierà liberando milioni di virus che infetteranno nuovi batteri. Tanto basti per illustrare il normale ciclo di vita del virus in natura.

Ho definito l'rna-replicasi e l'rna rispettivamente una macchina e un progetto. E lo sono, in un certo senso (un senso che discuteremo, sulla base di altre ragioni, in un altro capitolo), ma sono anche molecole, e i chimici umani sono in grado di depurarle, metterle in appositi recipienti e conservarli su uno scaffale. Questo è ciò che Sol Spiegelman e i suoi colleghi fecero in America negli anni Sessanta. Poi combinarono le due molecole in una soluzione e accadde una cosa affascinante. Nella provetta, le molecole di rna agirono come stampi per la sintesi di copie di se stesse, aiutate dalla presenza dell'rna-replicasi. Le macchine utensili e i progetti erano stati estratti e messi in frigorifero,

in recipienti separati. Poi, non appena veniva offerta loro la possibilità di combinarsi, e non appena si forniva loro, in acqua, la materia prima costituita dalle piccole molecole di cui avevano bisogno, rna e rna-replicasi tornavano alla loro vecchia attività truffaldina, anche se ora non si trovavano più in una cellula viva bensì in una provetta.

Da qui c'è solo un breve passo alla selezione naturale e all'evoluzione in laboratorio. Questa è solo una versione chimica del nostro modello dei biomorfi. Il metodo sperimentale consiste fondamentalmente nel preparare una lunga serie di provette contenenti ciascuna una soluzione dell'rna-replicasi e anche di materie prime, piccole molecole che possono essere usate per la sintesi di rna. Ogni provetta contiene le macchine utensili e le materie prime, ma finora se ne è stata in ozio, non facendo nulla in mancanza di un progetto sulla cui base lavorare. Ora nella prima provetta viene lasciata cadere una piccola quantità dell'rna stesso. Le apparecchiature della replicasi cominciano immediatamente a lavorare e producono grandi quantità di copie delle molecole di rna appena introdotte, le quali si propagano nella provetta. Ora una goccia della soluzione presa dalla prima provetta viene immessa nella seconda provetta. Il processo si ripete nella seconda provetta e poi una goccia, tratta da questa, viene usata per inseminare la terza provetta, e così di seguito.

Di tanto in tanto, a causa di errori di copiatura casuali, ha origine spontaneamente una molecola mutante di rna, leggermente diversa. È chiaro che se, per qualche ragione, la nuova varietà è competitivamente superiore a quella vecchia - nel senso che, per esempio, a causa della sua bassa «adesività», si replica più rapidamente o comunque con maggiore efficacia -, essa si diffonderà nella provetta in cui ha avuto origine, superando in numero il tipo parentale da cui è derivata. Poi, quando una goccia di soluzione viene tolta da quella provetta per inseminare la provetta successiva, l'inseminazione verrà eseguita dalla nuova varietà mutante. Se esaminiamo gli rna in una lunga sequenza di provette, avremo modo di osservare un fenomeno che può essere chiamato solo mutamento evolutivo. Varietà competitivamente superiori dell'rna prodotte al termine di varie «generazioni» in provetta potranno essere riposte in appositi recipienti ed etichettate in vista del futuro uso. Per esempio, una varietà chiamata V2 si replica molto più rapidamente del normale rna del virus Q-heta, probabilmente perché è più piccola.

A differenza dell'rna del Q-beta, essa non deve «preoccuparsi» di contenere i piani per produrre la replicasi. La replicasi viene infatti fornita graziosamente dagli sperimentatori. L'rna della varietà V2 fu usato come punto di partenza da Leslie Orgel e colleghi in California per un interessante esperimento, in cui essi imposero all'rna un ambiente «difficile».

Gli sperimentatori aggiunsero alle loro provette un veleno chiamato ethidium bromuro, che inibisce la sintesi dell'rna impedendo il funzionamento delle macchine utensili. Orgel e colleghi cominciarono con una soluzione debole del veleno. Dapprima la rapidità della sintesi fu rallentata dal veleno, ma dopo un'evoluzione durata per nove «generazioni» di trasferimento da una provetta all'altra era stato selezionato un nuovo ceppo di rna che era resistente al veleno. La frequenza della sintesi dell'rna era ora comparabile a quella del normale rna della varietà V2 in assenza di veleno.

Ora Orgel e colleghi raddoppiarono la concentrazione del veleno. La frequenza della duplicazione dell'rna tornò di nuovo a calare, ma dopo un'altra decina di trasferimenti da una provetta all'altra si era evoluto un ceppo di rna che era immune persino alla concentrazione superiore di veleno.

Attraverso successivi raddoppiamenti della concentrazione del veleno, essi riuscirono a far evolvere un ceppo di rna che era in grado di autoduplicarsi anche in presenza di concentrazioni di ethidium bromuro molto elevate, dieci volte superiori a quella che aveva inibito lo sviluppo dell'rna della varietà V2 ancestrale. Essi chiamarono il nuovo rna resistente rna V40. L'evoluzione della varietà V40 dalla V2 richiese un centinaio di «generazioni» di trasferimenti da una provetta all'altra (ovviamente, fra un trasferimento da una provetta all'altra e il successivo si hanno molte generazioni reali di replica dell'RNA).

Orgel eseguì anche esperimenti in cui non veniva fornito alcun enzima. Egli trovò che le molecole di rna sono in grado, in queste condizioni, di replicarsi spontaneamente, anche se con molta lentezza. Pare che in questo caso abbiano bisogno di qualche altro catalizzatore, come lo zinco. Questo fatto è importante perché non possiamo supporre che agli inizi della vita, quando sorsero i primi replicatori, ci fossero enzimi che li aiutassero a replicarsi. Probabilmente, però, c'era dello

zinco.

L'esperimento complementare fu condotto una decina di anni fa sotto la direzione di Manfred Eigen nel laboratorio dell'importante scuola tedesca che si occupa dell'origine della vita.

Questi ricercatori introdussero in provetta replicasi e blocchi di costruzione di rna ma non inseminarono la soluzione con rna.

Nondimeno, nella provetta si sviluppò spontaneamente una particolare grande molecola di rna e la stessa molecola tornò a evolversi ripetutamente in esperimenti indipendenti successivi!

Un accurato controllo dimostrò che non c'era alcuna possibilità di contaminazione casuale da parte di molecole di rna. Questo è un risultato notevole quando si consideri l'improbabilità statistica di un'evoluzione spontanea ripetuta di una stessa grande molecola. Questo fatto è molto più improbabile della battitura spontanea della frase «Methinks it is like a weasel» (vedi p. 76).

Come quella frase nel nostro modello elaborato al computer, quella particolare molecola di rna poté formarsi solo grazie a un'evoluzione graduale, cumulativa.

La varietà di rna prodotta ripetutamente in questi esperimenti aveva le stesse dimensioni e la stessa struttura delle molecole prodotte da Spiegelman. Mentre però l'rna di Spiegelman si era evoluto «per degenerazione» dall'rna più grande, esistente in natura, del virus Q-beta, quelli del gruppo di Eigen si erano formati quasi dal nulla. Questa particolare formula è ben adattata a un ambiente formato da provette contenenti replicasi pronta all'uso. Su di essa converge perciò la selezione cumulativa da due punti di partenza molto diversi. Le molecole di rna del virus Q-beta, più grandi, sono meno ben adattate a un ambiente di provetta, ma meglio adattate all'ambiente fornito da cellule di *Escherichia coli*.

Esperimenti come questi ci aiutano ad apprezzare la natura interamente automatica e non deliberata della selezione naturale. Le «macchine» della replicasi non «sanno» perché producono molecole di rna: questa loro attività è solo un prodotto secondario della loro struttura. E le molecole di rna stesse non sviluppano una strategia allo scopo di conseguire la loro duplicazione. Anche se potessero pensare, non c'è alcuna ragione per cui un'entità pensante dovrebbe essere motivata a fare copie di se stessa. Se io sapessi come fare copie di me stesso, non sono certo che darei a questo progetto un'alta priorità in concorrenza con tutte le altre cose che voglio fare: perché dovrei? Ma la motivazione non è pertinente per le molecole. È solo che la struttura dell'rna virale si trova a essere tale da indurre il meccanismo cellulare a sfornare copie di se stesso. E se una qualche entità, da qualche parte dell'universo, si trova ad avere la proprietà di essere capace di produrre altre copie di se stessa, verranno allora automaticamente in esistenza, com'è ovvio, un numero sempre maggiore di copie di quella entità. Non solo, ma, dato che esse formano automaticamente linee genealogiche e che contengono di tanto in tanto errori di copiatura, le versioni posteriori tenderanno a essere «migliori», nel formare copie di se stesse, rispetto alle versioni anteriori, a causa dei potenti processi di selezione cumulativa. Tutto questo è estremamente semplice e automatico. È tutto così prevedibile da essere quasi inevitabile.

Una molecola di rna che «ha successo» in provetta deve necessariamente tale successo a una qualche sua proprietà diretta, intrinseca, qualcosa di analogo all'«adesività» del mio esempio ipotetico. Ma proprietà come l'«adesività» sono piuttosto tediose. Esse sono proprietà elementari del replicatore stesso, proprietà che hanno un effetto diretto sulla sua probabilità di replicarsi. E se il replicatore ha qualche effetto su qualcos'altro, che influisce a sua volta su qualcos'altro, che agisce su qualcos'altro, che... infine, opera indirettamente sulla probabilità del replicatore di venire duplicato? È facile vedere che, quand'anche esistessero lunghe catene di cause come questa, la verità lapalissiana fondamentale sarebbe ancora valida. I replicatori che si trovano a possedere ciò che si richiede per duplicarsi verrebbero a predominare nel mondo, a prescindere da quanto lunga e indiretta possa essere la catena di connessioni causali per mezzo delle quali essi influiscono sulla loro probabilità di venire duplicati. E, per la stessa ragione, il mondo verrà a essere pieno delle connessioni presenti in questa catena causale. Noi prenderemo in considerazione tali connessioni e non potremo fare a meno di meravigliarcene.

Negli organismi moderni le vediamo di continuo. Sono gli occhi e la pelle e le ossa e le dita e il cervello e gli istinti. Queste cose sono gli strumenti della duplicazione dell'rna. Esse sono causate

dall'rna, nel senso che differenze negli occhi, nella pelle, nelle ossa, negli istinti ecc. sono causate da differenze dell'rna.

Esse esercitano un'influenza sulla duplicazione dell'rna che le ha causate, nel senso che incidono sulla sopravvivenza e sulla riproduzione del loro corpo, che contiene lo stesso rna, e la cui sorte è quindi condivisa dall'rna. Perciò l'rna stesso esercita un'influenza sulla sua propria duplicazione, attraverso gli attributi dei corpi. Si può dire che l'rna eserciti un potere sul suo proprio futuro e che i corpi e i loro organi e i loro modelli di comportamento siano gli strumenti di tale potere.

Quando parliamo del potere, parliamo delle conseguenze dei replicatori che influiscono sul proprio futuro, per quanto indirette tali conseguenze possano essere. Non importa quante connessioni ci siano nella catena fra causa ed effetto. Se la causa è un'entità autoduplicantesi, l'effetto, per quanto distante e indiretto, può essere soggetto alla selezione naturale. Compendierò l'idea generale narrando una storia particolare sui castori. Questa storia è ipotetica nei particolari, ma non può essere certamente lontana dal vero. Benché nessuno abbia compiuto ricerche sullo sviluppo di connessioni cerebrali nel castoro, sono state compiute ricerche di questo genere su altri animali, come i vermi. Io prenderò a prestito queste conclusioni e le applicherò ai castori poiché per molte persone i castori sono più interessanti e più simpatici dei vermi.

Un gene mutante in un castoro è solo un mutamento in una lettera di un testo formato da un miliardo di lettere; un mutamento in un particolare gene G. Durante la crescita del giovane castoro, il mutamento viene copiato, assieme a tutte le altre lettere del testo, in tutte le cellule del castoro. Nella maggior parte delle cellule il gene G non viene letto, mentre vengono lette altre lettere, pertinenti al funzionamento delle singole cellule. G viene letto però in alcune cellule nel cervello in sviluppo. Esso viene letto e trascritto in copie di rna. Le copie di lavoro dell'rna si muovono nell'interno delle cellule e infine alcune di esse vanno a urtare contro macchine per la produzione di proteine, dette ribosomi. Le macchine produttrici di proteine leggono i piani di lavoro dell'rna e producono nuove molecole secondo le istruzioni contenute nei piani. Queste molecole proteiche si avvolgono in una forma particolare determinata dalla loro sequenza di amminoacidi, la quale è governata a sua volta dalla sequenza di dna del gene G. Quando G muta, il mutamento produce una differenza cruciale rispetto alla sequenza di amminoacidi normalmente specificata dal gene G, e quindi rispetto alla forma avvolta della molecola proteica.

Queste molecole proteiche lievemente alterate vengono prodotte in massa dalle macchine produttrici di proteine all'interno delle cellule cerebrali in sviluppo. Queste, a loro volta, operano come enzimi, ossia come macchine che producono altri composti nelle cellule, i prodotti dei geni. I prodotti del gene G riescono a penetrare nella cellula attraverso la membrana plasmatica che la circonda, e vengono coinvolti nei processi per mezzo dei quali la cellula produce connessioni con altre cellule. A causa della lieve alterazione nei piani originali del dna, il ritmo di produzione di taluni di questi prodotti delle membrane è mutato. Questo mutamento incide a sua volta sul modo in cui certe cellule cerebrali in via di sviluppo si connettono fra loro. È intervenuta una sottile alterazione nel diagramma di cablaggio di una parte precisa del cervello del castoro, la quale è una conseguenza indiretta, di fatto molto lontana, di un mutamento nel testo del dna.

Ora, si dà il caso che quest'area particolare del cervello del castoro, a causa della sua posizione nel diagramma totale di cablaggio, abbia parte nel comportamento del castoro come costruttore di dighe. Ovviamente, grandi aree del cervello sono coinvolte ogni volta che il castoro costruisce una diga ma, quando la mutazione del gene G influisce su questa parte specifica dello schema di cablaggio del cervello, il mutamento ha un effetto preciso sul comportamento. Esso fa sì che il castoro tenga più alta la testa in acqua mentre nuota con un tronco fra le mascelle. Più alta, cioè, di come la tiene un castoro che non abbia questa mutazione. Questo fatto diminuisce un po' la probabilità che il fango attaccato al tronco venga staccato dall'acqua durante il viaggio sino alla diga in costruzione, con la conseguenza che il fango aumenta l'adesività del tronco e quindi la sua stabilità quando il castoro lo spinge nella struttura della diga. Questa proprietà dei tronchi tende ad applicarsi a tutti i tronchi trasportati e messi in opera da tutti i castori che sono partecipi di questa particolare mutazione. L'accresciuta adesività dei tronchi è una conseguenza, ancora una volta molto indiretta, di un'alterazione nel testo del dna.

L'accresciuta adesività dei tronchi fa della diga una struttura più solida, meno soggetta a rompersi. Grazie alla maggiore tenuta della diga, aumenta l'estensione del lago creato dalla diga stessa, cosa che rende più sicura contro i predatori la dimora dei castori al centro del lago, consentendo loro di allevare una prole più numerosa. Se consideriamo l'intera popolazione dei castori, quelli che posseggono il gene mutato tenderanno perciò in media ad allevare una prole più numerosa rispetto a quelli che non lo posseggono. I figli dei castori mutanti tenderanno a ereditare dai loro genitori copie di archivio del gene alterato. Perciò, nella popolazione, questa forma del gene diventerà sempre più numerosa al passare delle generazioni. Infine essa diventerà la norma, e non meriterà più il titolo di «mutante». Le dighe dei castori in generale avranno fatto un altro passo avanti. Il fatto che questa particolare storia sia ipotetica, e che i particolari possano essere sbagliati, è irrilevante. La diga dei castori si è evoluta per selezione naturale e perciò quanto è accaduto non può essere molto diverso, tranne che nei particolari pratici, dalla storia che ho narrato. Le implicazioni generali di questa concezione della vita sono spiegate e sviluppate nel mio libro *Il fenotipo esteso* e io non ripeterò qui le argomentazioni là esposte.

Il lettore noterà che, in questa storia ipotetica, nella catena causale che connetteva il gene alterato al miglioramento delle probabilità di sopravvivenza non c'erano meno di 11 connessioni.

Nella vita reale possono essercene anche di più. Ognuna di quelle connessioni, fosse essa un effetto sulla chimica all'interno di una cellula, un effetto posteriore sul modo in cui le cellule del cervello sono collegate fra loro, un effetto ancora più mediato sul comportamento o un effetto finale sull'estensione del lago, viene correttamente considerata come causata da un mutamento del dna. Non avrebbe alcuna importanza se le connessioni, anziché 11, fossero 111. Ogni effetto che un mutamento in un gene ha sulla propria possibilità di duplicazione è un facile bersaglio per la selezione naturale. È tutto perfettamente semplice, e deliziosamente automatico e non premeditato. Qualcosa di molto simile a questa situazione inventata è quasi inevitabile una volta che gli ingredienti fondamentali della selezione cumulativa - duplicazione, errore e potere - abbiano avuto origine.

Ma in che modo ciò si verificò? Come ebbero origine sulla Terra, prima che vi fosse la vita? Vedremo nel prossimo capitolo come si possa rispondere a questa difficile domanda.

VI

Origini e miracoli

Probabilità, fortuna, coincidenza, miracolo. Uno fra gli argomenti principali di questo capitolo sono i miracoli e ciò che intendiamo con questa parola. La mia tesi è che gli eventi che noi chiamiamo comunemente miracoli non sono soprannaturali, ma fanno parte di una gamma di eventi naturali più o meno improbabili. Un miracolo, in altri termini, se mai si verifica, non è altro che un evento molto fortunato. Gli eventi non si distinguono nettamente in eventi naturali e miracoli.

Ci sono eventi troppo improbabili per poterne contemplare la possibilità, ma non possiamo saperlo finché non abbiamo fatto un calcolo. E per fare questo calcolo dobbiamo sapere quanto tempo fu disponibile, e più in generale quante opportunità, perché l'evento si verificasse. Dato un tempo infinito, o un numero di opportunità infinito, è possibile qualsiasi cosa. I grandi numeri forniti proverbialmente dall'astronomia e i lunghissimi intervalli di tempo caratteristici della geologia si combinano a sconvolgere le nostre stime quotidiane di ciò che ci si attende e di ciò che è miracoloso. Io svilupperò la mia argomentazione usando un esempio specifico, che è l'altro tema principale di questo capitolo. Quest'esempio è il problema di come ebbe origine la vita sulla Terra. Per chiarezza mi concentrerò arbitrariamente su una particolare teoria dell'origine della vita, anche se ognuna delle teorie moderne sarebbe servita ugualmente bene allo scopo.

Nelle nostre spiegazioni possiamo accettare una certa quantità di fortuna, ma non troppa. Il problema è: quanta? L'immensità del tempo geologico ci dà il diritto di postulare coincidenze più improbabili di quelle che sarebbero permesse in un'aula di tribunale, ma ci sono nondimeno ancora dei limiti. La chiave di tutte le nostre spiegazioni moderne della vita è la selezione cumulativa.

Questa coordina una serie di eventi fortunati accettabili (mutazioni casuali) in una sequenza non casuale, così che, al termine della sequenza, il risultato dà l'illusione di essere il prodotto di una fortuna inverosimilmente grande, con un livello di improbabilità troppo elevato per poter essere dovuto al solo caso, anche concedendo un lasso di tempo milioni di volte maggiore dell'età attuale dell'universo. La chiave è costituita dalla selezione cumulativa, ma questa deve venire avviata e noi non possiamo sottrarci all'imperativo di postulare, all'origine della selezione cumulativa stessa, un evento casuale in un singolo passo.

E quel primo passo vitale fu un passo difficile, perché pare che al suo cuore ci sia un paradosso. I processi di duplicazione che conosciamo sembrano essere un meccanismo troppo complesso per poter funzionare. In presenza della «macchina utensile» replicasi, frammenti di rna si evolveranno, ripetutamente e in modo convergente, verso lo stesso punto finale, un traguardo la cui «probabilità» sembra evanescentemente piccola fino a quando non si rifletta sul potere della selezione cumulativa. Noi dobbiamo però fornire alla selezione cumulativa il nostro aiuto per permetterle di mettersi in moto. Essa infatti non funzionerà se non le forniremo un catalizzatore, come la «macchina utensile» replicasi del capitolo precedente. E pare improbabile che tale catalizzatore possa avere origine spontaneamente, tranne che sotto la guida di altre molecole di rna. Le molecole di dna vengono duplicate nel complicato meccanismo della cellula, come le parole scritte nelle fotocopiatrici, ma né le une né le altre sembrano capaci di duplicazione spontanea in assenza delle macchine che svolgono il lavoro. Una fotocopiatrice è capace di fare copie dei progetti per la sua costruzione, ma non di avere origine spontaneamente. I biomorfi si duplicano facilmente nell'ambiente fornito da un programma per computer scritto in modo opportuno, ma non sono in grado di scrivere il loro proprio programma o di costruire un computer per eseguirlo. La teoria dell'orologiaio cieco è estremamente efficace una volta che ci sia consentito di assumere la duplicazione e quindi la selezione cumulativa. Se però la duplicazione ha bisogno di macchine complesse, e se l'unico modo a noi noto perché una macchina complessa venga all'esistenza è la selezione cumulativa, noi veniamo a trovarci di fronte a un problema di difficile soluzione.

Senza dubbio il moderno meccanismo cellulare, l'apparecchiatura per la duplicazione del dna e per la sintesi delle proteine, ha tutti i contrassegni di una macchina altamente evoluta, appositamente costruita. Abbiamo visto quanto sia elevato il suo livello di efficienza come macchina di memorizzazione precisa di dati. Al suo livello di ultraminiaturizzazione, essa presenta lo stesso ordine di complessità di progettazione che l'occhio umano esibisce a un livello più grossolano. Tutti coloro che hanno meditato sull'argomento concordano che un'apparecchiatura così complessa come l'occhio umano non può avere avuto origine attraverso una selezione a passi singoli. Purtroppo pare che la stessa conclusione valga per le minime parti dei meccanismi cellulari per mezzo dei quali il dna duplica se stesso, e ciò si applica non solo alle cellule di organismi avanzati come noi stessi e le amebe, ma anche a organismi relativamente più primitivi come i batteri e le alghe azzurre.

La selezione cumulativa è quindi in grado di produrre la complessità, la quale non è invece accessibile alla selezione a passi singoli. Ma la selezione cumulativa non può funzionare se non in presenza di un qualche meccanismo minimo di duplicazione e di un qualche potere di duplicazione, e l'unico meccanismo di duplicazione che conosciamo sembra troppo complesso per avere avuto origine per mezzo di qualcosa di meno di molte generazioni di selezione cumulativa! Alcuni vedono in questo punto una pecca fondamentale nell'intera teoria dell'orologiaio cieco. Essi trovano qui una prova decisiva del fatto che in origine dev'esserci stato un architetto dell'universo, non un orologiaio cieco ma un orologiaio soprannaturale lungimirante. Forse, sostengono questi avversari della selezione cumulativa, il Creatore non controlla la sequenza degli eventi evolutivi di giorno in giorno; forse non creò espressamente la tigre e l'agnello, forse non creò un albero, ma creò il meccanismo originale di duplicazione e il potere di duplicazione, il meccanismo originario del dna e della sintesi delle proteine che rese possibile la selezione cumulativa, e quindi l'intera evoluzione. Questo è un argomento chiaramente debole, anzi del tutto inconsistente. La complessità organizzata è la cosa che noi abbiamo difficoltà a spiegare. Una volta che ci venga permesso semplicemente di postulare la complessità organizzata, anche se solo la complessità organizzata della macchina per la duplicazione del dna e per la sintesi delle proteine, è relativamente facile invocarla come generatore

di una complessità ancora più organizzata. È questo, in effetti, l'argomento della maggior parte di questo libro. Ma ovviamente un qualsiasi dio capace di progettare con intelligenza qualcosa di così complesso come la macchina per la duplicazione del dna e per la sintesi delle proteine doveva essere almeno altrettanto complesso e organizzato quanto la macchina stessa. Molto di più, se supponiamo che egli sia capace inoltre di funzioni così avanzate come ascoltare preghiere e perdonare peccati. Spiegare l'origine della macchina per la duplicazione del dna e per la sintesi delle proteine invocando un Architetto soprannaturale significa non spiegare assolutamente nulla, giacché in questo modo rimane inspiegata l'origine dell'Architetto. In questo caso si deve sostenere che «Dio esiste da sempre», e se ci si consente una scappatoia così facile si potrebbe allora dire altrettanto bene che «il dna esiste da sempre», o che «la vita esiste da sempre».

Quanto più riusciremo ad allontanarci dai miracoli, dalle cose estremamente improbabili, dalle coincidenze fantastiche, dai grandi eventi casuali, e quanto più saremo in grado di spezzettare grandi eventi casuali in una serie cumulativa di piccoli eventi casuali, tanto più soddisfacenti riusciranno le nostre spiegazioni. In questo capitolo ci chiediamo però quanto può essere improbabile, quanto può essere miracoloso un singolo evento che ci sia ancora lecito postulare. Qual è il massimo evento singolo di pura coincidenza, di pura fortuna miracolosa, non adulterata, che possiamo ancora ammettere nelle nostre teorie, senza per questo perdere il diritto di dire che abbiamo una spiegazione soddisfacente della vita? Perché una scimmia possa scrivere a macchina battendo a caso sui tasti: «Methinks it is like a weasel» occorre una quantità di fortuna molto grande ma ancora misurabile. Noi abbiamo calcolato che la probabilità di una tale occorrenza è di circa uno su diecimila milioni di milioni di milioni di milioni di milioni di milioni (10 alla 40esima). Nessuno può veramente comprendere o immaginare un numero tanto grande, e noi pensiamo che questo grado di improbabilità sia pressa poco sinonimo di impossibilità. Ma anche se non riusciamo a comprendere questi livelli di improbabilità nella nostra mente, non dobbiamo però lasciarci spaventare. Il numero 10 alla 40esima può essere molto grande ma noi riusciamo ancora a scriverlo, e possiamo ancora usarlo nei calcoli. Ci sono, dopo tutto, numeri ancora più grandi: 10 alla 46, per esempio, non è semplicemente un numero più grande; per ottenerlo si deve sommare 10 alla 40 a se stesso ben un milione di volte. E se potessimo avere a disposizione un esercito sterminato di 10 alla 46 scimmie, ognuna con la sua macchina per scrivere? In tal caso - guarda guarda! - una di esse batterebbe solennemente la frase: «Methinks it is like a weasel», e un'altra scriverebbe quasi certamente: «Cogito, ergo sum». Il problema, ovviamente, è che noi non potremmo mai mettere assieme un numero così sterminato di scimmie. Se tutta la materia dell'universo fosse trasformata in carne di scimmie, non avremmo ancora scimmie a sufficienza. Il miracolo di una scimmia che batta la frase: «Methinks it is like a weasel» è quantitativamente troppo grande, misurabilmente troppo grande, perché noi possiamo ammetterla nelle nostre teorie su ciò che accade nella realtà. Ma noi non potevamo saperlo prima di sederci tranquilli a fare il calcolo.

Ci sono dunque dei livelli di pura fortuna non solo troppo grandi per la debole immaginazione umana, ma anche troppo grandi per essere ammessi nei nostri calcoli sull'origine della vita. Ma, per ripetere la domanda, quanto può essere improbabile, quanto può essere miracoloso un singolo evento che ci sia ancora lecito postulare? Non dobbiamo evitare questa domanda solo perché implica grandi numeri. È una domanda perfettamente valida, e noi possiamo almeno fare un elenco di ciò che dobbiamo conoscere per poter calcolare la risposta.

Ora, ecco un'idea affascinante. La risposta alla nostra domanda - quanta fortuna ci sia lecito postulare - dipende dalla risposta a un'altra domanda: se il nostro pianeta sia l'unico a possedere forme di vita o se la vita abbondi dappertutto nell'universo. L'unica cosa che sappiamo con certezza è che una volta la vita ha avuto origine qui, su questo stesso pianeta. Non abbiamo però alcuna idea sul problema se la vita esista anche in qualche altro posto nell'universo. Può darsi benissimo che essa esista solo sulla Terra. Alcuni hanno calcolato che forme di vita devono esistere anche altrove, sulla base delle seguenti ragioni (vedremo fra poco dove sia l'errore di questo ragionamento). Nell'universo esistono probabilmente almeno 1020 (cioè 100 miliardi di miliardi) pianeti grosso modo idonei. Sappiamo che la vita è sorta sulla Terra, cosicché non può essere poi tanto improbabile. È perciò quasi inevitabile che almeno qualcuno fra tutti quei miliardi di miliardi di

pianeti possiede forme di vita.

L'errore nel ragionamento consiste nell'inferire che, essendo la vita sorta qui, essa non possa essere troppo improbabile. Quest'inferenza, come è facile rendersi conto, contiene l'assunto implicito che, qualsiasi cosa si sia verificata sulla Terra, debba essersi verificata con ogni probabilità anche altrove nell'universo, cosicché in questo modo si finisce con l'eludere l'intera questione. In altri termini, questo tipo di argomento statistico, che devono esserci forme di vita altrove nell'universo perché c'è vita qui sulla Terra, contiene come assunto implicito proprio ciò che si vuole dimostrare. Ciò non significa che la conclusione che la vita sia molto diffusa nell'universo sia necessariamente sbagliata. La mia opinione è anzi che essa sia probabilmente giusta. Significa semplicemente che il particolare ragionamento che ha condotto a essa non è affatto un ragionamento, ma solo un assunto.

Consideriamo, per amore della discussione, l'assunto alternativo che la vita sia sorta una volta sola e che ciò sia avvenuto qui sulla Terra. È forte la tentazione di obiettare a questo assunto sulla base delle seguenti ragioni emotive. In questo atteggiamento non c'è qualcosa di terribilmente medievale? Esso non ricorda forse il tempo in cui la Chiesa insegnava che la nostra Terra era il centro dell'universo, e le stelle erano solo piccole luci poste in cielo per la nostra edificazione (o, tesi ancor più assurdamente presuntuosa, che le stelle compissero i loro corsi in cielo per esercitare le loro influenze astrologiche sulla nostra piccola vita)? Quanta presunzione c'è nel supporre che, fra tutti i miliardi di miliardi di pianeti nell'universo, debba essere stato prescelto per darvi origine alla vita proprio quel piccolo cantuccio insignificante che è il nostro mondo, in quell'angolino anonimo che è il nostro sistema solare, in quel remoto angolo di universo che è la nostra galassia! Perché mai proprio il nostro pianeta?

Io sono profondamente compiaciuto, nel profondo del cuore, per il fatto che siamo riusciti a sottrarci all'angustia mentale della Chiesa del Medioevo e non nascondo il mio disprezzo per gli astrologi moderni; tanto maggiore è quindi il mio rammarico nel dover dire che la retorica sul cantuccio insignificante nel paragrafo precedente è solo vuota retorica. È possibilissimo che quel piccolo cantuccio insignificante che è il nostro pianeta sia letteralmente l'unico in cui ha avuto origine la vita. Il punto è che, nell'ipotesi che ci fosse un unico pianeta in cui avesse mai avuto origine la vita, quello dovrebbe essere il nostro pianeta, per l'ottima ragione che «noi» siamo qui a discutere la questione! Se l'origine della vita è un evento così improbabile da essersi verificato una sola volta nell'universo, allora il nostro pianeta deve essere quel pianeta. Non possiamo quindi fondarci sul fatto che la Terra possiede la vita per concludere che questa dev'essere abbastanza probabile da poter essere sorta anche su altri pianeti. Un tale ragionamento sarebbe un circolo vizioso. Prima di cominciare a rispondere al problema di quanti altri pianeti dell'universo possano possedere la vita, dobbiamo proporre dei ragionamenti indipendenti su quanto sia facile o difficile l'origine della vita su un pianeta.

Questa non è però la domanda che ci siamo posti in principio. La nostra domanda fu: quanta fortuna ci è lecito assumere in una teoria sull'origine della vita sulla Terra? Io dissi che la risposta dipende dal fatto che la vita sia sorta una volta sola o molte volte. Cominciamo col dare un nome alla probabilità, per quanto bassa, che la vita abbia origine su un qualsiasi pianeta designato a caso di un qualche tipo particolare. Chiamiamo questo numero la probabilità di generazione spontanea o pgs. Possiamo tentare di stimare questo valore sedendoci a consultare i nostri trattati di chimica o a scoccare scintille attraverso miscugli plausibili di gas atmosferici in laboratorio, o a calcolare le probabilità di duplicare molecole che hanno origine spontaneamente in un'atmosfera planetaria tipica. Supponiamo che la nostra migliore congettura della pgs sia un qualche numero piccolissimo, diciamo uno su un miliardo. Questa è chiaramente una probabilità così piccola che noi non abbiamo la minima speranza di poter duplicare nei nostri esperimenti di laboratorio un evento così fantasticamente fortunato, miracoloso come l'origine della vita. Ma se supponiamo, come ci è perfettamente lecito fare per amore della discussione, che la vita abbia avuto origine una sola volta nell'universo, ne segue che ci è permesso di postulare in una teoria una quantità di fortuna molto grande, poiché nell'universo c'è un numero molto grande di pianeti in cui la vita avrebbe potuto avere origine. Se, come dice una stima, esistono 100 miliardi di miliardi di pianeti, questo numero è 100 miliardi di volte più grande persino della bassissima pgs da noi postulata. Per concludere questo

ragionamento, la quantità massima di fortuna che ci è permesso di supporre prima di rifiutare una particolare teoria dell'origine della vita, corrisponde alla probabilità di uno su N , dove N è il numero di pianeti adatti nell'universo. Nella parola «adatto» si celano molte cose, ma per la quantità di fortuna che questo ragionamento ci autorizza a supporre poniamo un limite superiore di 1 su 100 miliardi di miliardi.

Riflettiamo un po' sul significato di tutto questo. Noi andiamo da un chimico e gli diciamo: metti da parte i libri e la calcolatrice; tempera la matita e aguzza l'ingegno; riempi la testa di formule e metti nelle tue beute metano e ammoniaca e idrogeno e anidride carbonica e tutti gli altri gas che un pianeta primitivo privo di vita dovrebbe avere; fa' cuocere tutto assieme; fa' scoccare fulmini in miniatura attraverso le tue atmosfere simulate e lampi di ispirazione nel tuo cervello; applica tutti i tuoi metodi chimici più efficaci, e dacci la tua stima chimica migliore della probabilità che un pianeta tipico generi spontaneamente una molecola capace di autoduplicarsi. O, per esprimerci in altro modo, quanto tempo dovremmo attendere prima che eventi chimici casuali sul pianeta, urti termici casuali di atomi e di molecole, diano origine a una molecola capace di autoduplicarsi? I chimici non sanno rispondere con precisione a questa domanda. Secondo la maggior parte dei chimici moderni dovremmo probabilmente attendere un tempo molto lungo rispetto al metro di una vita umana, ma forse non tanto lungo rispetto alla scala del tempo cosmologico. La storia fossile della Terra suggerisce che questa attesa potrebbe essere press'a poco di un miliardo di anni - un «eone», per usare una comoda definizione moderna -, giacché questo è grosso modo il tempo trascorso fra l'origine della Terra, circa 4,5 miliardi di anni fa, e l'era dei primi organismi fossili. Ma il punto importante del nostro argomento del «gran numero di pianeti» è che, anche se il chimico ci dicesse che dobbiamo attendere il verificarsi di un «miracolo», che dobbiamo attendere un miliardo di miliardi di anni, molto di più dell'età stessa dell'universo, noi potremmo ancora accettare questo verdetto con serenità. Nell'universo ci sono probabilmente più di un miliardo di miliardi di pianeti disponibili. Se ognuno di essi durasse quanto la Terra, avremmo ancora a nostra disposizione circa un miliardo di miliardi di miliardi di pianeti-anni. Non male! Un miracolo diventa realtà per mezzo della matematica.

In questo ragionamento c'è un assunto nascosto. In realtà ce ne sono molti, ma ce n'è uno in particolare su cui vorrei soffermarmi. Questo assunto è che, una volta che la vita abbia avuto origine (cioè una volta che siano venuti all'esistenza replicatori e selezione cumulativa), essa avanza sempre fino al punto in cui le sue creature evolvono un'intelligenza sufficiente per speculare sulle loro origini. Se così non è, la nostra stima della quantità di fortuna che ci è lecito postulare deve ridursi conformemente.

Per essere più precisi, l'improbabilità massima dell'origine della vita su qualsiasi pianeta che le nostre teorie possano legittimamente postulare è data dal numero di pianeti disponibili nell'universo diviso per la probabilità che la vita, una volta che abbia avuto inizio, evolva un'intelligenza sufficiente per speculare sulle proprie origini.

Può sembrare un po' strano che «un'intelligenza sufficiente per speculare sulle proprie origini» sia una variabile pertinente.

Per capire perché lo sia, consideriamo un assunto alternativo.

Supponiamo che l'origine della vita sia un evento del tutto probabile, ma che sia invece estremamente improbabile la successiva evoluzione dell'intelligenza, richiedendo una grande quantità di fortuna. Supponiamo che l'origine dell'intelligenza sia un fenomeno così improbabile da essersi verificata su un solo pianeta nell'universo, anche se la vita ha avuto origine su molti pianeti. Allora, sapendo di essere abbastanza intelligenti per discutere questo problema, sappiamo anche che quel pianeta dev'essere la Terra. Supponiamo ora che l'origine della vita, e l'origine dell'intelligenza una volta data la vita, siano entrambe eventi altamente improbabili. Allora, la probabilità che un qualsiasi pianeta, come la Terra, abbia entrambi questi colpi di fortuna è il prodotto delle due probabilità, ognuna molto bassa, il che dà una probabilità molto minore.

È come se, nella nostra teoria di come siamo venuti all'esistenza, ci fosse permesso di postulare una certa razione di fortuna. Questa razione ha, come suo limite superiore, il numero di pianeti idonei nell'universo. Data la nostra razione di fortuna, possiamo «spenderla» come una risorsa limitata nel

corso della nostra spiegazione della nostra esistenza. Se noi consumiamo quasi per intero la nostra dotazione di fortuna nella teoria di come la vita ha avuto inizio su un pianeta, ci viene permesso di postulare ben poca altra fortuna in parti successive della nostra teoria, per esempio nell'evoluzione cumulativa del cervello e dell'intelligenza. Se non consumiamo tutta la nostra razione di fortuna nella nostra teoria dell'origine della vita, ci rimane qualcosa da spendere nelle nostre teorie dell'evoluzione successiva dopo che la selezione cumulativa si è messa in moto. Se vogliamo consumare la maggior parte della nostra disponibilità di fortuna nella nostra teoria sull'origine dell'intelligenza, non ci rimane molto da spendere nella teoria sull'origine della vita: in questo caso dobbiamo trovare una teoria che faccia dell'origine della vita un evento quasi inevitabile. Alternativamente, se non abbiamo bisogno dell'intera nostra razione di fortuna per queste due fasi della teoria, potremo usare la parte eccedente per postulare l'esistenza della vita anche altrove nell'universo.

La mia opinione personale è che, una volta che la selezione cumulativa abbia preso il via nel modo appropriato, abbiamo bisogno di postulare solo una quantità di fortuna relativamente piccola nella successiva evoluzione della vita e dell'intelligenza.

La selezione cumulativa, una volta avviata, mi sembra abbastanza efficace da rendere l'evoluzione dell'intelligenza almeno probabile, se non inevitabile. Ciò significa che noi possiamo, se vogliamo, spendere in una sola tornata, nella nostra teoria dell'origine della vita su un pianeta, virtualmente l'intera razione di fortuna che ci è lecito postulare. Abbiamo perciò a nostra disposizione, se vogliamo usarla, la probabilità di 1 su 100 miliardi di miliardi come limite superiore (ossia di 1 sull'intero numero di pianeti disponibili che pensiamo esistano) da spendere nella nostra teoria sull'origine della vita. Questa è la quantità massima di fortuna che ci è permesso di postulare nella nostra teoria. Supponiamo di voler suggerire, per esempio, che la vita abbia avuto inizio quando vennero spontaneamente all'esistenza per puro caso sia il dna sia il suo meccanismo di duplicazione fondato sulle proteine. Noi possiamo permetterci il lusso di una teoria così dispendiosa purché le probabilità contrarie al verificarsi di questa coincidenza su un pianeta non siano superiori a 100 miliardi di miliardi a uno.

Questa concessione può sembrare molto generosa. Essa è probabilmente abbastanza grande da spiegare l'origine spontanea del dna o dell'rna, ma è ben lontana dal permetterci di fare a meno del tutto della selezione cumulativa. Le probabilità contro la formazione spontanea in un solo colpo fortunato - per opera della selezione a passi singoli - di un corpo ben organizzato, capace di volare bene come un rondone o di nuotare bene come un delfino, o di avere la vista acuta quanto quella di un falco, sono fantasticamente maggiori non solo del numero dei pianeti ma anche di quello degli atomi presenti nell'universo! È quindi assolutamente certo che nelle nostre spiegazioni della vita avremo bisogno di una grande quantità di selezione cumulativa.

Ma benché, nella nostra teoria dell'origine della vita, ci sia consentito di spendere una razione massima di fortuna ammontante, forse, a probabilità dell'ordine di 100 miliardi di miliardi contro uno, io sospetto che non avremo bisogno di più di una piccola frazione di tale capitale. L'origine della vita su un pianeta può sembrarci un evento molto improbabile se paragonata alle nostre norme quotidiane, o anche ai criteri del laboratorio di chimica; e nondimeno possiamo ritenere abbastanza probabile che essa si sia verificata non solo una volta ma molte volte nell'intero universo. Noi possiamo considerare il ragionamento statistico sul numero dei pianeti come un argomento cui ricorrere solo in ultima istanza. Alla fine del capitolo sosterrò la tesi paradossale che la teoria che stiamo cercando deve forse sembrare necessariamente improbabile, e persino miracolosa, al nostro giudizio soggettivo (a causa del modo in cui il nostro giudizio soggettivo si è formato). Nondimeno, è ancora ragionevole per noi cominciare col cercare quella fra le teorie dell'origine della vita che ha il grado minimo di improbabilità. Se la teoria secondo cui il dna e il suo meccanismo di copiatura ebbero origine spontaneamente è così improbabile da costringerci a supporre che la vita nell'universo sia molto rara, e che potrebbe addirittura esistere solo sulla Terra, la prima cosa che dobbiamo fare è di cercare di trovare una teoria più probabile. Possiamo dunque produrre speculazioni su modi relativamente probabili in cui la selezione cumulativa potrebbe aver preso l'avvio?

La parola «speculazione» ha connotazioni negative, le quali sono qui però del tutto a sproposito. Noi non possiamo sperare in nulla più della speculazione, visto che gli eventi di cui stiamo parlando si verificarono quattro miliardi di anni fa, e accadde inoltre in un mondo che doveva essere radicalmente diverso da quello che conosciamo oggi. Per esempio, è quasi certo che nell'atmosfera terrestre non fosse presente ossigeno libero. Benché la chimica del mondo possa essere cambiata, le leggi della chimica non sono mutate (ecco perché vengono chiamate leggi), e i chimici moderni sanno abbastanza su quelle leggi da poter formulare delle speculazioni ben fondate, speculazioni che devono superare test rigorosi di plausibilità imposti da tali leggi. Non si può speculare in modo arbitrario e irresponsabile, consentendo alla propria immaginazione di sbrigliarsi alla ricerca di espedienti insoddisfacenti come i «viaggi nell'iperspazio» o le «deformazioni temporali» della fantascienza spaziale. Fra tutte le speculazioni possibili sull'origine della vita, la maggior parte non si conciliano con la chimica e possono essere escluse, persino se facciamo pieno uso del nostro argomento statistico di riserva sul numero dei pianeti. Un'accurata speculazione selettiva è perciò un esercizio costruttivo. Si dev'essere però dei chimici per farla.

Io sono un biologo e non un chimico, e devo far ricorso ai chimici per presentare stime attendibili. Vari chimici prediligono però teorie diverse, e non c'è davvero scarsità di teorie. Io potrei tentare di esporre imparzialmente tutte queste teorie: un modo di procedere senza dubbio appropriato in un libro di testo, ma questo non è un libro di testo. L'idea basilare dell'Orologiaio cieco è che non abbiamo bisogno di postulare un architetto o un progettista per comprendere la vita, o qualsiasi altra cosa nell'universo. Noi qui siamo interessati al tipo di soluzione che si deve trovare, un tipo di soluzione che tenga conto della natura del problema che ci troviamo a dover affrontare. Io penso che questo problema possa essere spiegato nel modo migliore non considerando un gran numero di teorie particolari, bensì prendendo in esame una sola teoria come esempio del modo in cui si può risolvere il problema basilare: come prese l'avvio la selezione cumulativa.

Ora, quale teoria dovrei scegliere come mio esempio rappresentativo? La maggior parte dei libri di testo danno il massimo peso alla famiglia di teorie fondate su un «brodo» organico primordiale. Pare probabile che l'atmosfera della Terra, prima dell'avvento della vita, fosse simile a quella di altri pianeti che sono ancor oggi privi di vita. Mancava l'ossigeno, abbondavano l'idrogeno, l'acqua e l'anidride carbonica, e c'erano molto probabilmente ammoniaca, metano e altri gas organici semplici. I chimici sanno che un'atmosfera priva di ossigeno simile a questa tende a promuovere la sintesi spontanea di composti organici. Essi hanno sperimentato in laboratorio ricostruzioni in miniatura di condizioni esistenti sulla Terra primitiva, facendo passare nelle loro beute scintille elettriche per simulare i fulmini e la luce ultravioletta, che dovette essere molto più intensa prima che la formazione attorno alla Terra di uno strato di ozono esercitasse un'azione di schermatura filtrando i raggi solari.

I risultati di questi esperimenti hanno suscitato molto interesse.

In queste beute si sono formate spontaneamente molecole organiche, alcune delle quali appartenenti agli stessi tipi generali che si trovano di norma solo in esseri viventi. Non sono apparsi né dna né rna, ma fra le molecole che si sono formate sono stati individuati alcuni componenti di questi acidi nucleici, le purine e pirimidine, come pure i mattoni per la costruzione delle proteine, gli amminoacidi. L'anello mancante per questa classe di teorie è ancora l'origine della duplicazione. I mattoni non si sono ancora uniti a formare una catena capace di autoduplicazione come l'rna. Forse un giorno lo faranno.

In ogni caso, però, la teoria del brodo organico primordiale non è quella che ho scelto per illustrare il tipo di soluzione che dobbiamo cercare. Avendola già nel mio primo libro. Il gene egoista, ho pensato che qui fosse più opportuno cercare di sondare una teoria un po' meno di moda (anche se recentemente ha cominciato a guadagnare terreno), che mi sembra avere almeno qualche buona probabilità di essere nel giusto. La sua audacia la fa guardare con simpatia, ed essa illustra bene le proprietà che ogni teoria della vita deve avere per essere soddisfacente. Questa è la teoria «minerale inorganica» del chimico di Glasgow Graham Cairns-Smith, da lui proposta per la prima volta vent'anni fa e sviluppata da allora in tre libri, l'ultimo dei quali, Sette indizi sull'origine della vita, tratta dell'origine della vita come di un mistero che ha bisogno di una soluzione alla Sherlock

Holmes.

Cairns-Smith pensa che il meccanismo del dna e delle proteine abbia avuto origine da relativamente poco tempo, forse non più di tre miliardi di anni fa. Prima di allora ci furono molte generazioni di selezione cumulativa, fondata su entità duplicanti molto diverse. Una volta venuto all'esistenza il dna, esso si dimostrò tanto più efficiente come replicatore, e tanto più potente nei suoi effetti sulla propria duplicazione, che il sistema di duplicazione originario fu scartato e dimenticato. Secondo quest'opinione, il moderno meccanismo del dna è un ultimo arrivato, un usurpatore recente del ruolo di replicatore fondamentale, essendo subentrato in tal ruolo a un replicatore anteriore e più grossolano. Potrebbe esservi stata addirittura un'intera serie di tali usurpazioni, ma il processo di duplicazione originario dev'essere stato abbastanza semplice da avere origine attraverso quella che ho chiamato «selezione per passi singoli».

I chimici suddividono la loro scienza in due branche principali: chimica organica e inorganica. La chimica organica è la chimica di un particolare elemento, il carbonio. La chimica inorganica è tutto il resto. Il carbonio è importante e merita di avere una propria branca privata nella chimica, in parte perché la chimica della vita è tutta chimica del carbonio, e in parte perché quelle stesse proprietà che rendono la chimica del carbonio adatta alla vita la rendono adatta anche per processi industriali, come quelli dell'industria della plastica. La proprietà essenziale degli atomi di carbonio che li rende così adatti alla vita e alla sintesi industriale consiste nella loro capacità di unirsi assieme a formare un repertorio illimitato di tipi diversi di molecole molto grandi. Un altro elemento che possiede alcune delle stesse proprietà è il silicio. Benché sulla Terra la chimica delle forme di vita attuali sia per intero chimica del carbonio, questa situazione potrebbe non trovare riscontro nell'intero universo, e potrebbe anche non essere stata sempre vera sulla Terra. Cairns-Smith crede che la vita originaria sul nostro pianeta fosse fondata su cristalli inorganici autoreplicanti come i silicati. Se questa affermazione corrisponde a verità, i replicatori organici, e infine il dna, devono in seguito essere subentrati in tale ruolo o averlo usurpato.

Cairns-Smith fornisce alcuni argomenti a sostegno della plausibilità generale di quest'idea del «subentro». Un arco di pietre, per esempio, è una struttura stabile, capace di stare in piedi per molti anni anche in assenza di malta per cementarlo.

La costruzione di una struttura complessa per opera dell'evoluzione è come tentare di costruire un arco senza malta avendo il permesso di toccare solo una pietra per volta. Se si riflette su questo compito in modo ingenuo, non si riuscirà a portarlo a termine. L'arco sarà stabile una volta che sia stata messa in opera l'ultima pietra, ma le fasi intermedie sono instabili. È però abbastanza facile costruire l'arco se ci viene permesso di togliere pietre, oltre che aggiungerne. Cominciamo col costruire un solido cumulo di pietre, dopo di che costruiamo l'arco poggiando sulla parte superiore di questo solido fondamento. Poi, quando l'arco è tutto in posizione, compresa la chiave di volta, di importanza vitale, in alto, togliamo con cura le pietre di sostegno e, con un po' di fortuna, l'arco resterà in piedi. Stonehenge è incomprensibile finché non ci rendiamo conto che i costruttori usarono qualche tipo di struttura di sostegno, o forse delle rampe di terra, che non sono più sul posto. Noi possiamo vedere solo il prodotto finale, e da quello dobbiamo inferire la struttura portante, che oggi non esiste più. Similmente, il dna e le proteine sono due pilastri di un arco stabile ed elegante, che continua a esistere senza difficoltà una volta che tutte le sue parti si trovino a esistere simultaneamente. È difficile immaginare che esso possa avere avuto origine in virtù di un processo a passi singoli, a meno che una qualche struttura anteriore di sostegno non sia scomparsa completamente. Tale struttura dev'essere stata costruita a sua volta per opera di una forma anteriore di selezione cumulativa, sulla cui natura noi oggi possiamo fare solo delle congetture. Essa dev'essersi fondata però su entità duplicanti con un potere sul loro proprio futuro.

Cairns-Smith congetture che i replicatori originari fossero cristalli di materiali inorganici, come quelli che si trovano in argille e fanghi. Un cristallo è solo una grande disposizione ordinata di atomi e molecole allo stato solido. A causa di proprietà che possiamo concepire come la loro «forma», atomi e piccole molecole tendono naturalmente a disporsi in un modo fisso e ordinato. È un po' come se «volessero» disporsi in un modo particolare, ma quest'illusione è solo una conseguenza involontaria delle loro proprietà. Il loro modo «preferito» di disporsi assieme in una

certa sequenza dà all'intero cristallo la sua struttura. Esso significa anche che, in un cristallo grande quanto un diamante, qualsiasi parte del cristallo è esattamente identica a qualsiasi altra parte, eccezion fatta per i punti in cui sono presenti difetti. Se noi potessimo rimpicciolirci sino alla scala atomica, vedremmo file di atomi quasi senza fine, estese in linea retta sino all'orizzonte: gallerie di ripetizione geometrica.

Poiché siamo interessati alla duplicazione, la prima cosa che dobbiamo sapere è: i cristalli possono replicare la loro struttura?

I cristalli sono composti da miriadi di strati di atomi (o loro equivalenti) e ogni strato costruisce su quello sottostante. In una soluzione gli atomi (o gli ioni; qui non abbiamo ragione di preoccuparci della differenza) sono liberamente sospesi, ma se incontrano un cristallo presentano una naturale tendenza ad andare a occupare una determinata posizione sulla sua superficie.

Una soluzione di comune sale da cucina contiene ioni sodio e ioni cloruro che si urtano in un modo più o meno caotico. Un cristallo di sale da cucina è una disposizione compatta, ordinata di ioni sodio che si alternano con ioni cloruro ad angoli retti fra loro. Quando ioni sospesi in acqua vanno a urtare contro la superficie dura del cristallo, tendono a aderirvi. Essi si fissano esattamente nelle posizioni giuste per causare l'aggiunta al cristallo di un nuovo strato, esattamente simile a quello sottostante. Così, una volta che un cristallo abbia cominciato a formarsi cresce in maniera ordinata, e ogni strato è uguale allo strato sottostante.

A volte i cristalli cominciano a formarsi in soluzione spontaneamente. Altre volte devono essere «inseminati», o per opera di particelle di polvere o per opera di piccoli cristalli lasciati cadere nella soluzione dall'esterno. Cairns-Smith ci invita a eseguire l'esperimento seguente. Sciogliamo una grande quantità di iposolfito di sodio, il fissatore per fotografia, in acqua caldissima. Lasciamo poi che la soluzione si raffreddi, mettendo ogni cura nell'evitare che nella soluzione cadano particelle di polvere. La soluzione è ora «soprasatura», pronta e in attesa di produrre cristalli, ma ancora priva di un qualche cristallo che funga da seme per avviare il processo. Cito da Sette indizi sull'origine della vita di Cairns-Smith: Togliamo con cura il coperchio dal bicchiere, lasciamo cadere un pezzetto di cristallo di iposolfito sulla superficie della soluzione e osserviamo con stupore che cosa accade. Il nostro cristallo cresce visibilmente; di tanto in tanto si rompe e anche i pezzi crescono [...] Ben presto il nostro bicchiere è affollato di cristalli, alcuni lunghi vari centimetri. Poi, dopo qualche minuto, tutto si ferma. La soluzione magica ha perduto il suo potere, anche se, per ridarle vigore, è sufficiente riscaldare e riraffreddare il bicchiere... Essere soprasaturo significa contenere in soluzione una quantità di una sostanza maggiore di quella che dovrebbe esserci [...] La soluzione fredda soprasatura non sapeva quasi letteralmente che cosa fare. Occorreva «dirglielo» aggiungendo un pezzo di cristallo che aveva già le sue unità (a miliardi e miliardi) organizzate insieme nel modo che è tipico per i cristalli di iposolfito.

La soluzione doveva essere inseminata.

Alcune sostanze chimiche hanno il potenziale di cristallizzare in due modi alternativi. Tanto la grafite quanto i diamanti, per esempio, sono cristalli di carbonio puro. I loro atomi sono identici. Le due sostanze differiscono fra loro solo nella disposizione geometrica degli atomi. Nei diamanti gli atomi di carbonio sono disposti sui vertici di un tetraedro, formando una configurazione estremamente stabile. E questa la ragione per cui i diamanti sono così duri. Nella grafite essi sono disposti invece in esagoni piatti disposti l'uno sopra l'altro. I legami fra i vari strati sono deboli ed essi tendono perciò a scivolare l'uno sull'altro; è questa la ragione per cui la grafite appare scivolosa al tatto e per cui viene usata come lubrificante. Purtroppo non si possono far cristallizzare i diamanti da una soluzione col procedimento dell'inseminazione, come si fa con l'iposolfito. Se si potesse saremmo tutti ricchi; anzi, a pensarci meglio no, perché ogni sciocco sarebbe in grado di fare la stessa cosa.

Supponiamo ora di avere una soluzione soprasatura di qualche sostanza, simile all'iposolfito per la disponibilità a cristallizzare dalla soluzione e al carbonio per la capacità di cristallizzare in due modi distinti. Un modo potrebbe essere quello della grafite, con gli atomi disposti in strati, e la conseguente formazione di piccoli cristalli piani; mentre l'altro modo darebbe cristalli massicci, come i diamanti. Ora lasciamo cadere simultaneamente nella nostra soluzione soprasatura un

minuscolo cristallo piatto e un piccolo cristallo di forma più massiccia, di forma simile a un diamante. Possiamo descrivere che cosa accadrebbe sviluppando la descrizione data da Cairns-Smith del suo esperimento con l'iposolfito. Osserviamo con meraviglia che cosa succede. I nostri due cristalli crescono visibilmente: di tanto in tanto si rompono, e anche i vari pezzi crescono. I cristalli piatti danno origine a una popolazione di cristalli piatti, mentre i cristalli più massicci danno origine a una famiglia di cristalli massicci. Se uno dei due tipi di cristalli presenterà una tendenza a crescere e a dividersi più rapidamente rispetto all'altro tipo, avremo un tipo semplice di selezione naturale. Al processo manca però ancora un ingrediente vitale per poter dare origine a un mutamento evoluzionistico. Quell'ingrediente è la variazione ereditaria, o qualcosa di equivalente a essa. Anziché due soli tipi di cristallo occorrerebbe un'intera gamma di varianti minori che formassero linee genealogiche di forma simile, e che a volte «mutassero», producendo forme nuove. I veri cristalli posseggono forse qualcosa di corrispondente alla mutazione ereditaria?

Argille e fanghi e rocce sono composti da piccoli cristalli. Essi sono abbondanti sulla Terra e probabilmente lo sono stati sempre. Quando si osserva la superficie di qualche tipo di argilla e di altri minerali con un microscopio elettronico a scansione si vede uno spettacolo bello e sorprendente. I cristalli crescono come file di fiori o di cacti, giardini di petali di rose inorganiche, minuscole spirali simili a sezioni di piante succulente, irte canne d'organo, complesse forme angolari come in origami cristallini in miniatura, forme contorte come rigetti di lombrico o crema dentifricia spremuta. Le strutture ordinate diventano ancora più sorprendenti a livelli di ingrandimento maggiori. A scale che tradiscono la posizione reale degli atomi, la superficie di un cristallo rivela tutta la regolarità di un tweed a spina di pesce tessuto a macchina. Ma - e qui sta il punto vitale - nei cristalli ci sono difetti. Proprio nel centro di un'estensione ordinata di un disegno a spina di pesce può esserci una chiazza identica a tutto il resto a parte il fatto di essere ruotata a un angolo diverso, cosicché il disegno va in un'altra direzione. Oppure il disegno può essere orientato nello stesso modo, ma ogni fila può essere «scivolata» di mezza fila in una direzione. Quasi tutti i cristalli esistenti in natura presentano difetti. E, una volta che un difetto sia apparso, esso tende a essere copiato man mano che successivi strati di cristallo si incrostano su di esso.

I difetti possono presentarsi in qualsiasi punto sulla superficie di un cristallo. Il lettore, se gli piace pensare, come a me, alla capacità di memorizzazione di informazione, può immaginare il numero enorme di tipi diversi di difetti che potrebbero essere creati sulla superficie di un cristallo. Tutti i calcoli che abbiamo fatto sull'impacchettamento del Nuovo Testamento nel dna di un singolo batterio potrebbero essere fatti altrettanto bene per quasi tutti i cristalli. Quel che il dna possiede in più rispetto ai normali cristalli è un mezzo con cui leggere la propria informazione. Lasciando da parte il problema della lettura, si potrebbe facilmente escogitare un codice arbitrario per mezzo del quale i difetti nella struttura atomica del cristallo potrebbero denotare numeri binari. Si potrebbero allora memorizzare vari Nuovi Testamenti in un cristallo minerale grande quanto la capocchia di uno spillo. Su una scala maggiore, è questo essenzialmente il modo in cui l'informazione musicale è memorizzata sulla superficie di un disco laser (un compact disc). Le note musicali vengono convertite dal computer in numeri binari. Si usa un laser per incidere una sequenza di minuscoli difetti sulla superficie altrimenti perfettamente liscia del disco. Ogni piccolo buco scavato corrisponde a un numero 1 binario (o a uno 0, le etichette sono arbitrarie). Quando si ascolta il disco, un altro fascio laser «legge» la sequenza dei difetti, e un computer appositamente progettato incorporato nell'impianto per la riproduzione del suono ritraduce i numeri binari in vibrazioni sonore, le quali vengono quindi amplificate in modo che noi possiamo udirle.

Benché i dischi laser vengano usati oggi principalmente per la musica, si può memorizzare su uno di essi l'Enciclopedia Britannica e leggerla usando la stessa tecnica laser. I difetti dei cristalli al livello atomico sono molto più piccoli delle buche incise sulla superficie di un disco laser, cosicché i cristalli potrebbero potenzialmente memorizzare in un'area data una maggiore quantità di informazione. In effetti le molecole di dna, la cui capacità di memorizzazione di informazioni ci ha già impressionati, sono qualcosa di simile ai cristalli stessi. Benché i cristalli di argilla siano in grado di immagazzinare teoricamente le stesse prodigiose quantità di informazione del dna o dei dischi laser, nessuno intende dire che lo abbiano mai fatto. Il ruolo dell'argilla e di altri cristalli

minerali nella teoria consiste nell'agire come gli originali replicatori «a bassa tecnologia», quegli stessi che furono infine soppiantati dal dna, che disponeva invece di un'alta tecnologia. Tali cristalli minerali si formano spontaneamente nelle acque del nostro pianeta senza i complessi «meccanismi» di cui ha bisogno il dna, e sviluppano spontaneamente difetti, alcuni dei quali possono essere duplicati in strati successivi del cristallo. Se frammenti di cristallo con difetti opportuni in seguito si rompessero, potremmo immaginare che svolgessero la funzione di «semi» o «germi» per la formazione di nuovi cristalli, ciascuno dei quali «erediterebbe» il tipo di difetto dei suoi «genitori». Abbiamo quindi un quadro speculativo dei cristalli minerali sulla Terra primordiale che ci presenta alcune fra le proprietà della duplicazione, della moltiplicazione, della trasmissione ereditaria e della mutazione che sarebbero state necessarie per dare l'avvio a una forma di selezione cumulativa. Manca ancora l'ingrediente del «potere»: la natura dei replicatori deve avere influenzato in qualche misura la loro probabilità di replicarsi.

Quando parliamo di replicatori in astratto, vedemmo che il «potere» poteva consistere semplicemente in proprietà dirette del replicatore stesso, in proprietà intrinseche come la «adesività». A questo livello elementare il nome «potere» sembra scarsamente giustificato. Io lo uso solo a causa di ciò che esso potrà diventare in fasi successive dell'evoluzione: il potere di un dente del veleno di un serpente, per esempio, di propagare (attraverso le sue conseguenze indirette sulla sopravvivenza dei serpenti) la codificazione del dna per i denti del veleno. Sia che i replicatori originali a bassa tecnologia fossero cristalli minerali o precursori organici diretti del dna stesso, noi possiamo congetturare che il «potere» da loro esercitato fu diretto ed elementare, come l'adesività. Leve di potere avanzate, come il dente del veleno di un serpente o il fiore di un'orchidea in forma di ape, vennero solo molto tempo dopo.

Che cosa potrebbe significare la parola «potere» per un'argilla? Quali proprietà incidentali dell'argilla potrebbero influire sulla probabilità che essa, la stessa varietà di argilla, si propaghi nel territorio circostante? Le argille sono composte da ingredienti chimici come acido silicico e ioni metallici, che si trovano in soluzione in fiumi e corsi d'acqua dopo essere stati dissolti - «dilavati» - dalle rocce più a monte. Se le condizioni sono giuste, più a valle queste sostanze si cristallizzano di nuovo, formando argille. (In questo caso l'espressione «corso d'acqua» significherà più probabilmente il filtrare e sgocciolare dell'acqua freatica che non un fiume impetuoso a cielo aperto. Per semplicità io continuerò però a usare l'espressione generale «corso d'acqua».) Se un tipo particolare di cristallo d'argilla possa o no formarsi dipenderà, fra l'altro, dalla rapidità e dal tipo di flusso del corso d'acqua. Ma può accadere anche che siano i depositi di argilla a influire sul flusso dell'acqua. Essi lo fanno inavvertitamente, modificando il livello, la forma e la consistenza del suolo attraverso cui l'acqua scorre. Consideriamo una variante di argilla che abbia appena conseguito la proprietà di modificare la struttura del suolo, così che il suo flusso dell'acqua aumenti la sua velocità. Ne consegue che l'argilla in questione viene dilavata un'altra volta. Questo tipo di argilla, per definizione, non ha molto «successo». Un'altra argilla sfavorita potrebbe essere quella che modificasse il flusso dell'acqua in un modo che andasse a vantaggio di un tipo di argilla rivale. Non sto suggerendo, ovviamente, che delle argille «vogliano» continuare a esistere. Sto parlando in ogni caso solo di conseguenze incidentali, di fatti conseguiti a proprietà che il replicatore si trova in qualche modo ad avere. Consideriamo un'altra variante ancora dell'argilla. Questa variante rallenta il flusso in modo tale che la deposizione del proprio tipo di argilla ne viene intensificata. È chiaro che questa seconda variante tenderà a diventare più comune, in quanto «manipola» i corsi d'acqua a proprio «vantaggio». Questa sarà dunque una variante di argilla «favorita». Finora ci siamo occupati però solo della selezione a passi singoli. Non potrebbe mettersi in movimento una forza di selezione cumulativa?

Per spingerci un po' oltre con le nostre speculazioni, supponiamo che una variante di argilla migliori le proprie probabilità di essere depositata formando degli sbarramenti su corsi d'acqua. Questa è una conseguenza non deliberata, dovuta ai peculiari difetti di struttura presenti in quest'argilla. In ogni corso d'acqua in cui esista questo tipo di argilla, a monte degli sbarramenti si formano grandi distese di acqua stagnante, poco profonda, e il corso principale dell'acqua viene indirizzato in un nuovo corso. In queste acque stagnanti viene depositata altra argilla dello stesso tipo. Una successione di

tali distese d'acqua stagnante prolifera lungo qualsiasi corso d'acqua che sia «contaminato» da «germi» di questo tipo di argilla. Ora, poiché il corso principale del fiume è deviato, durante la stagione asciutta le acque stagnanti tendono a prosciugarsi. L'argilla si asciuga e si spacca al sole e gli strati superiori sono spazzati via sotto forma di polvere. Ogni particella di polvere eredita i caratteristici difetti strutturali dell'argilla parentale che creò gli sbarramenti, la struttura che le diede la proprietà di costruire sbarramenti. Per analogia con l'informazione genetica che piove dal mio salice sul canale, potremmo dire che la polvere porta «istruzioni» su come costruire sbarramenti sui fiumi e infine produrre altra polvere. La polvere trasportata dal vento si disperde a grandi distanze, e ci sono buone probabilità che qualche sua particella vada a cadere in un altro corso d'acqua, finora non «infettato» dai germi di questo tipo di argilla produttrice di sbarramenti. Una volta inseminato dal tipo giusto di polvere, un nuovo corso d'acqua comincia a produrre cristalli di argilla costruttrice di sbarramenti, e ha inizio un'altra volta l'intero ciclo di deposizione, sbarramento, inaridimento, erosione.

Se chiamassimo questa sequenza di fenomeni un ciclo «di vita» aggireremmo un problema importante, ma questo è comunque una sorta di ciclo, e condivide con i veri cicli di vita la capacità di dare l'avvio a una selezione cumulativa. Poiché i corsi d'acqua sono infettati da «germi» di polvere trasportati dal vento e provenienti da altri corsi d'acqua, possiamo ordinarli in ordine di «ascendenza» e «discendenza». L'argilla che sta costruendo sbarramenti e determinando la formazione di distese d'acqua stagnante sul corso d'acqua B vi è arrivata dal corso d'acqua A sotto forma di cristalli di polvere trasportati dal vento. Infine anche le acque stagnanti del corso d'acqua B si prosciugheranno e formeranno polvere, che infetterà i corsi d'acqua F e P. Rispetto alla provenienza dell'argilla produttrice di sbarramenti, possiamo disporre i corsi d'acqua in «alberi genealogici». Ogni corso d'acqua infettato ha un corso d'acqua «genitore», e può avere più di un corso d'acqua «figlio». Ogni corso d'acqua è analogo a un corpo, il cui «sviluppo» è influenzato da «geni», costituiti in questo caso da semi di polvere, un corpo che infine genera nuovi semi di polvere. Ogni «generazione» nel ciclo ha inizio quando i cristalli-semi si staccano dal corso d'acqua genitore sotto forma di polvere. La struttura cristallina di ogni particella di polvere è stata copiata dall'argilla del corso d'acqua parentale. Essa trasmetterà poi quella struttura cristallina al corso d'acqua figlio, dove crescerà e si moltiplicherà, propagando infine di nuovo i suoi «semi». La struttura cristallina ancestrale viene conservata da una generazione all'altra, a meno che non si verifichi un qualche errore occasionale nell'accrescimento dei cristalli, un'occasionale alterazione nella disposizione degli atomi. Gli strati successivi dello stesso cristallo copieranno lo stesso difetto, e se il cristallo si rompe in due darà origine a una sottopopolazione di cristalli alterati. Ora, se l'alterazione renderà il cristallo più o meno efficiente nel ciclo di sbarramento-inaridimento-erosione, questo fatto inciderà sul numero di copie che esso produrrà nelle «generazioni» successive. I cristalli alterati potrebbero, per esempio, essere più soggetti a rompersi (più inclini a «riprodursi»).

L'argilla formata da cristalli alterati potrebbe avere un maggior potere di sbarramento in tutta una varietà di modi ben precisi.

Essa potrebbe rompersi più facilmente al sole. Potrebbe sbriciolarsi più facilmente e ridursi più rapidamente in polvere. Le particelle di polvere potrebbero essere meglio predisposte a prendere il vento, come la lanugine su un seme di salice. Alcuni tipi di cristallo potrebbero indurre un accorciamento del «ciclo di vita», producendo di conseguenza un'«evoluzione» accelerata. Ci sono molte opportunità per successive «generazioni» di «migliorare» progressivamente col passare del tempo, attraverso la trasmissione di proprietà migliorate da una generazione all'altra. In altri termini, ci sono molte opportunità per l'instaurarsi di una selezione cumulativa per quanto rudimentale.

Questi piccoli voli della fantasia, che sono semplici abbellimenti della teoria di Cairns-Smith, riguardano solo uno dei vari «cicli di vita» minerali che avrebbero potuto avviare la selezione cumulativa lungo la sua via di estrema importanza. Varietà di cristalli diverse potrebbero passare a nuovi corsi d'acqua non sbriciolandosi in «semi» di polvere, ma suddividendo il loro corso d'acqua in una quantità di corsi minori avviati in diverse direzioni, fino a raggiungere e infettare nuovi

sistemi fluviali.

Alcune varietà potrebbero creare cascate capaci di erodere più rapidamente le rocce e accelerare quindi il passaggio in soluzione delle materie prime necessarie per produrre argille più a valle lungo il corso d'acqua. Alcune varietà di cristallo potrebbero migliorare la propria situazione rendendo più difficili le condizioni per varietà «rivali» in competizione fra loro per materie prime. Alcune varietà potrebbero diventare «predatrici», rompendo varietà rivali e usandone gli elementi come materie prime. Il lettore è pregato di tenere a mente che non intendo affatto suggerire un'azione «deliberata» né in questo caso né nelle forme di vita moderne, fondate sul dna. Voglio dire solo che il mondo tende automaticamente a riempirsi di quelle varietà di argilla (o di dna) che si trovano ad avere proprietà che le rendono persistenti e che ne favoriscono la propagazione.

Passiamo ora alla fase successiva dell'argomentazione. Alcune linee genealogiche di cristalli potrebbero avere la proprietà di catalizzare la sintesi di nuove sostanze capaci di favorirne il passaggio da una «generazione» all'altra. Queste sostanze secondarie non avrebbero (almeno all'inizio) loro linee genealogiche di ascendenti e discendenti, ma verrebbero prodotte ex novo da ogni generazione di replicatori primari. Esse potrebbero essere viste come strumenti delle linee genealogiche di cristalli replicanti, come gli inizi di primitivi «fenotipi». Cairns-Smith crede che delle molecole organiche abbiano avuto una importanza preminente fra gli «strumenti» non replicanti dei suoi replicatori cristallini inorganici. Molecole organiche sono usate spesso nell'industria chimica inorganica a causa dei loro effetti sul flusso dei liquidi e sulla rottura o sulla crescita di particelle inorganiche: esattamente i tipi di effetti che avrebbero potuto influire sul «successo» di linee genealogiche di cristalli replicanti. Per esempio, un minerale di argilla dal leggiadro nome di montmorillonite tende a spaccarsi in presenza di piccole quantità di una molecola organica dal nome meno leggiadro di carbossimetilcellulosa. Quantità ancora più piccole di carbossimetilcellulosa, d'altra parte, hanno esattamente l'effetto opposto, aiutando le particelle di montmorillonite a aderire fra loro. I tannini, un altro tipo di molecola organica, vengono usati nell'industria del petrolio per facilitare le perforazioni nel fango. Se l'industria petrolifera è in grado di sfruttare molecole organiche per migliorare la perforabilità nel fango, non ce alcuna ragione per cui una selezione cumulativa non avrebbe dovuto condurre allo stesso tipo di sfruttamento da parte di minerali autoduplicantisi.

A questo punto la teoria di Cairns-Smith viene a ottenere una conferma indiretta che ne accresce la plausibilità. Altri chimici, che sostengono teorie più convenzionali fondate sul «brodo primordiale» organico, hanno infatti accettato da molto tempo la tesi che dei minerali di argilla potrebbero avere svolto una funzione utile. Per citare uno di loro (D.M. Anderson): «Trova molto credito la tesi che alcune, e forse molte, delle reazioni chimiche e dei processi abiotici che condussero all'origine sulla Terra di microrganismi capaci di replicarsi occorsero molto presto nella storia della Terra, in stretta prossimità alle superfici di minerali d'argilla e ad altri sostrati inorganici». Questo autore prosegue elencando cinque «funzioni» dei minerali d'argilla nel favorire l'origine della vita organica, per esempio la «concentrazione di reagenti chimici per mezzo di adsorbimento». Non occorre che elenchiamo qui tutte cinque le funzioni, e neppure che le comprendiamo. Dal nostro punto di vista, quel che importa è che ciascuna di queste cinque «funzioni» dei minerali di argilla possa essere rovesciata in direzione opposta. Ciò dimostra la stretta associazione che può esistere fra la sintesi di sostanze chimiche organiche e superfici di argilla. È perciò un punto in più a vantaggio di questa teoria che replicatori di argilla sintetizzassero molecole organiche e le usassero ai loro propri fini. Cairns-Smith discute, in modo più dettagliato di quanto io non possa fare qui, gli antichi usi che i suoi replicatori di cristalli di argilla potrebbero avere avuto per proteine, zuccheri e, cosa più importante di tutte, per acidi nucleici come l'rna. Egli suggerisce che l'rna sia stato impiegato dapprima per fini puramente strutturali, come nel caso dei tannini usati per perforazioni petrolifere nel fango e nel caso dei saponi e dei detersivi usati da noi. Molecole simili a quelle dell'rna, a causa della loro catena carica negativamente, tenderebbero a formare un rivestimento sulla superficie esterna di particelle di argilla. Questo fatto ci conduce in ambiti della chimica che esorbitano dai nostri intendimenti. Ai nostri fini, infatti, quel che importa è che l'rna, o qualche cosa di simile, sia stato disponibile per molto tempo prima di autoduplicarsi. Quando divenne infine autoduplicante,

questo fu un espediente sviluppato da «geni» di cristalli minerali per migliorare l'efficienza di produzione dell'rna (o di qualche molecola simile). Una volta, però, che una nuova molecola autoduplicantesi era venuta all'esistenza, poté prendere l'avvio un nuovo tipo di selezione cumulativa. I nuovi replicatori, se in origine avevano svolto una funzione marginale, risultarono tanto più efficienti rispetto ai replicatori originali da soppiantarli. Essi si svilupparono ulteriormente, e infine perfezionarono il codice del dna quale lo conosciamo noi oggi. I replicatori minerali originali furono messi da parte come impalcature logore, e l'intera varietà della vita moderna si sviluppò a partire da un progenitore comune relativamente recente, con un singolo sistema genetico uniforme e una biochimica in gran parte uniforme.

Nel Gene egoista congetturai che noi oggi potremmo essere sulla soglia del passaggio a un nuovo tipo di trasmissione «genetica». I replicatori di dna costruirono «macchine per la sopravvivenza» per se stessi: il corpo degli organismi viventi che li comprendono. Nell'ambito del proprio equipaggiamento, il corpo dei vari organismi sviluppò un computer incorporato: il cervello. Il cervello sviluppò la capacità di comunicare con altri cervelli per mezzo del linguaggio e di tradizioni culturali. Ma il nuovo ambiente creato dalla tradizione culturale dischiude nuove possibilità per entità autoduplicantisi. I nuovi replicatori non sono dna e non sono cristalli d'argilla. Essi sono tipi di informazione che possono prosperare solo in cervelli o in prodotti artificiali di cervelli: libri, computer e via dicendo. Ma, dato che i cervelli, i libri e i computer esistono, questi nuovi replicatori, che io ho chiamato «memi» per distinguerli dai geni, sono in grado di propagarsi da cervello a cervello, da cervello a libro, da libro a cervello, da cervello a computer, da computer a computer. Man mano che si propagano possono cambiare: ossia mutare. E forse i memi «mutanti» possono esercitare i tipi di influenza che io qui sto chiamando «potere duplicatore». Si ricordi che con questa espressione intendo ogni sorta di influenza che incida sulla loro probabilità di propagarsi. L'evoluzione sotto l'influenza dei nuovi replicatori - l'evoluzione memica - è nella sua infanzia. Essa si manifesta nei fenomeni che noi chiamiamo evoluzione culturale. L'evoluzione culturale è di molti ordini di grandezza più rapida dell'evoluzione fondata sul dna, cosa che ci induce ancor più a pensare a un tipo di propagazione che ne «soppianta» uno meno efficiente. E se siamo all'inizio dell'avvento di un nuovo tipo di replicatore, è concepibile che esso si imporrà in modo tale da lasciare molto indietro il suo dna parentale (e la sua bisavola argilla, se ha ragione Cairns-Smith). In questo caso, possiamo essere assolutamente certi che i computer saranno all'avanguardia.

Non potrà accadere che un giorno molto remoto computer intelligenti specolino sulle loro lontane origini? E che uno di loro si imbatte nella verità eretica, che essi hanno avuto origine da una forma di vita anteriore fondata sulla chimica organica, del carbonio, anziché sui principi elettronici fondati sul silicio del loro corpo? Un Cairns-Smith robotico scriverà forse un libro sull'avvento del replicatore elettronico? Non può essere che egli riscopra un qualche equivalente elettronico della metafora dell'arco, e che si renda conto che i computer non possono essere venuti spontaneamente all'esistenza, ma devono avere avuto origine da un qualche processo anteriore di selezione cumulativa?

Un tale autore non potrebbe entrare nei particolari e ricostruire il dna come un plausibile replicatore antico, vittima poi di un'usurpazione elettronica? Ed essere abbastanza lungimirante da congetturare che lo stesso dna potrebbe avere scalzato a sua volta replicatori ancora più remoti e primitivi, cristalli di silicati inorganici? Se egli si troverà in uno stato d'animo poetico, non potrebbe vedere addirittura una sorta di giustizia nel ritorno finale a una vita basata sul silicio, col dna ridotto a non più di un interludio, anche se durato per ben tre miliardi di anni?

Questa è fantascienza, e probabilmente potrà sembrare molto forzata, ma non importa. Di incidenza più immediata è il fatto che la teoria di Cairns-Smith, e in effetti tutte le teorie sull'origine della vita, possono sembrare forzate e difficili da credere.

Il lettore trova molto improbabili entrambe le teorie, la teoria dell'argilla di Cairns-Smith e la teoria più ortodossa del brodo organico primordiale? Non sembra che occorra forse un miracolo per far sì che degli atomi, urtandosi a caso, si uniscano assieme in una molecola autoduplicantesi? Be', a volte ho anch'io la stessa impressione. Ma vorrei considerare più a fondo questo argomento dei miracoli e

dell'improbabilità. Così facendo dimostrerò un punto che è paradossale ma proprio perciò tanto più interessante. Questo punto è che noi, in quanto scienziati, dovremmo essere un po' preoccupati se l'origine della vita non sembrasse miracolosa alla nostra coscienza umana. Una teoria apparentemente miracolosa (ossia una teoria che appaia miracolosa alla coscienza umana normale) è esattamente il tipo di teoria che dobbiamo cercare in questo particolare argomento dell'origine della vita. Questo ragionamento, che finisce con l'essere una discussione di ciò che noi intendiamo per miracolo, occuperà la parte restante di questo capitolo. In un certo senso, esso è un'estensione del ragionamento che abbiamo fatto in precedenza sui miliardi di pianeti.

Che cosa intendiamo dunque per miracolo? Un miracolo è qualcosa che accade, ma che è estremamente sorprendente. Se una statua di marmo della Vergine Maria ci facesse d'improvviso un cenno con la mano noi tutti parleremmo di miracolo, perché tutta la nostra esperienza e conoscenza ci dicono che il marmo non si comporta in quel modo. Io ho appena detto: «Possa essere colpito in questo momento dal fulmine». Se il fulmine mi colpisse nello stesso istante, questo sarebbe considerato un miracolo.

In realtà, però, nessuno di questi due fatti sarebbe giudicato dalla scienza come assolutamente impossibile. Essi sarebbero considerati solo molto improbabili, il cenno con la mano della statua molto più improbabile del fulmine. Il fulmine ha l'abitudine di colpire di tanto in tanto delle persone. Ognuno di noi potrebbe essere colpito da un fulmine, ma la probabilità in qualsiasi minuto è piuttosto bassa (anche se il Guinness dei primati presenta, in una curiosa illustrazione, un uomo della Virginia, noto col nomignolo di parafulmine umano, in convalescenza in ospedale dopo il suo settimo «colpo di fulmine», con un'espressione di preoccupata confusione sul volto). L'unica cosa miracolosa nella mia ipotetica storia sarebbe la coincidenza fra la mia invocazione verbale di quella sventura e l'essere veramente colpito dal fulmine.

Coincidenza significa improbabilità moltiplicata. La probabilità che io venga colpito dal fulmine in un qualsiasi minuto della mia vita è di forse 1 a 10 milioni, come stima prudente. Anche la probabilità che io inviti il fulmine a colpirmi in un particolare istante è molto bassa. Io l'ho appena fatto, per l'unica volta nei 23.400.000 minuti della mia vita finora trascorsi, cosicché definirò questa probabilità di uno su 25 milioni. Per calcolare la probabilità congiunta che questa coincidenza si verifichi in un qualsiasi minuto dobbiamo moltiplicare le due probabilità separate. Per il mio calcolo approssimativo ottengo un risultato di circa uno su 250 miliardi. Se mi capitasse una coincidenza di questa grandezza, dovrei definirla un miracolo, e in futuro dovrei fare attenzione a come parlo. Benché le probabilità contro questa coincidenza siano estremamente alte, noi siamo però ancora in grado di calcolarle. Esse non sono letteralmente zero.

Nel caso della statua le molecole all'interno del marmo si urtano di continuo fra loro in direzioni casuali. Gli urti delle diverse molecole si cancellano fra loro, cosicché la mano della statua, nella sua globalità, rimane immobile. Se però, per una mera coincidenza, tutte le molecole si muovessero in una stessa direzione nello stesso momento, la mano potrebbe muoversi. Se poi esse invertissero di nuovo, in uno stesso istante, la direzione del movimento la mano potrebbe muoversi all'indietro, verso la posizione originaria. In questo modo una statua di marmo potrebbe fare un cenno verso di noi. Potrebbe accadere. Le probabilità contro una tale coincidenza sono inimmaginabilmente grandi ma non sono ancora incalcolabili. Un fisico mio collega le ha gentilmente calcolate per me. Il numero è così grande che l'intera età dell'universo sarebbe un tempo troppo breve per metterne per iscritto tutti gli zeri! È pressa poco dello stesso ordine l'improbabilità che una mucca raggiunga con un salto la Luna. La conclusione di questa parte del nostro ragionamento è che noi possiamo addentrarci col calcolo in regioni di un'improbabilità miracolosa di gran lunga maggiore di ciò che possiamo immaginare come plausibile.

Prendiamo ora in esame quest'argomento di ciò che si può considerare plausibile. Ciò che noi possiamo immaginare come plausibile è una banda limitata al centro di uno spettro molto più ampio di ciò che è realmente possibile. A volte essa è più ristretta di ciò che esiste realmente. Una buona analogia in proposito ci viene fornita dalla luce. I nostri occhi sono costruiti per percepire una banda limitata di frequenze elettromagnetiche (quelle che noi chiamiamo luce), grosso modo al centro dello spettro che va dalle onde lunghe della radio da un lato ai corti raggi X dall'altro. Noi non

possiamo vedere i raggi all'esterno della stretta banda della luce, ma possiamo fare calcoli su di essi, e possiamo costruire strumenti in grado di rivelarli. Nello stesso modo sappiamo che le scale delle dimensioni e del tempo si estendono in entrambe le direzioni molto fuori dell'ambito di ciò che possiamo visualizzare. La nostra mente non riesce a concepire le grandi distanze di cui si occupa l'astronomia né le piccole distanze di cui si occupa la fisica atomica, ma possiamo rappresentare tali distanze per mezzo di simboli matematici. La nostra mente non può immaginare un intervallo di tempo breve come un picosecondo, ma possiamo fare calcoli sui picosecondi, e possiamo costruire computer in grado di compiere calcoli nel brevissimo lasso di tempo di picosecondi. La nostra mente non può immaginare una durata di tempo di un milione di anni, e tanto meno i miliardi di anni che figurano normalmente nei calcoli dei geologi.

Come i nostri occhi possono vedere solo la stretta banda di frequenze elettromagnetiche che i nostri antenati sono stati equipaggiati a vedere dalla selezione naturale, così il nostro cervello è stato costruito per far fronte a bande limitate di dimensioni e di tempo. È presumibile che i nostri progenitori non avessero alcun bisogno di far fronte a dimensioni e tempi al di fuori della gamma ristretta delle esigenze pratiche della vita quotidiana, cosicché il nostro cervello non sviluppò mai la capacità di immaginarle. È probabilmente significativo che le dimensioni del nostro corpo, comprese fra un metro e mezzo e due metri, si collochino press'a poco alla metà della gamma di grandezze che noi possiamo immaginare. E la durata di alcuni decenni della nostra vita si trova press'a poco alla metà della gamma di tempi che possiamo immaginare.

Lo stesso tipo di cose possiamo dire sulle improbabilità e i miracoli. Immaginiamoci una scala graduata di improbabilità, analoga alla scala di dimensioni dagli atomi alle galassie, o alla scala dei tempi dai picosecondi ai miliardi di anni. Su questa scala possiamo segnare vari punti di riferimento. All'estremo limite, nella parte sinistra della scala, abbiamo eventi che sono quasi certi, come la probabilità che domani sorga il Sole: l'argomento della scommessa di mezzo penny da parte di G.H.

Hardy. In prossimità di questo estremo sinistro della scala si trovano cose che sono solo leggermente improbabili, come ottenere due sei gettando una sola volta un paio di dadi. La probabilità di una coppia di sei in un lancio solo è di 1 a 36. Io sono sicuro che abbiamo ottenuto questo risultato abbastanza spesso. Muovendo verso l'estremità destra dello spettro, un altro punto di riferimento è la probabilità che un giocatore, nella distribuzione delle carte al bridge, ottenga un perfect deal, un seme completo. La probabilità di una tale evenienza è di 1 a 2.236.197.406.895.366.368.301.559.999. Chiamiamo questa probabilità il «dealione», l'unità di improbabilità. Se una cosa avente l'improbabilità di un dealione fosse predetta e poi accadesse, dovremmo diagnosticare un miracolo, a meno che, cosa più probabile, non sospettassimo una frode. Ma una cosa del genere potrebbe accadere distribuendo le carte onestamente, e sarebbe molto molto più probabile dell'ipotesi della statua di marmo che ci fa un cenno con la mano. Nondimeno, persino quest'ultimo evento, come abbiamo visto, ha il suo posto giusto lungo lo spettro di eventi che potrebbero accadere. Esso è misurabile, anche se in unità molto più grandi dei gigadealioni. Fra il lancio di una coppia di sei con due dadi, e la distribuzione di un seme completo di bridge, c'è una gamma di eventi più o meno improbabili che a volte accadono, compreso quello di essere una volta o l'altra colpiti dal fulmine, di vincere un premio importante al totocalcio, di fare una buca in un colpo solo al golf e via dicendo. Da qualche parte in questa gamma di eventi ci sono anche quelle coincidenze che ci danno una sensazione di paura facendoci correre un brivido per la schiena, come quando sogniamo per la prima volta da decenni una persona, venendo poi a sapere che essa era morta durante la notte.

Queste strane coincidenze sono molto impressionanti quando accadono a noi o a uno dei nostri amici, ma la loro improbabilità si misura solo in picodealioni.

Avendo costruito la nostra scala matematica di improbabilità, con i suoi punti di riferimento segnati, passiamo ora a gettar luce su quella parte della scala di cui ci occupiamo nel nostro pensiero e nella nostra conversazione abituali. L'ampiezza del fascio di luce che noi usiamo per illuminare la parte della scala che ci interessa è analoga alla gamma ristretta di frequenze elettromagnetiche che i nostri occhi possono vedere, o alla gamma limitata di dimensioni o di tempi, vicini alla nostra scala di

grandezza e alla durata della nostra vita, che noi possiamo immaginare. Nello spettro delle improbabilità, il nostro fascio di luce risulta illuminare solo la banda ristretta dall'estremo sinistro (certezza) sino a piccoli miracoli, come una buca in un colpo solo o un sogno che si avvera. Al di fuori della banda illuminata dal fascio di luce c'è una vasta gamma di improbabilità calcolabili matematicamente.

Il nostro cervello è stato costruito dalla selezione naturale per stimare la probabilità e il rischio, esattamente come i nostri occhi sono stati costruiti per stimare la lunghezza d'onda elettromagnetica. Noi siamo equipaggiati per fare calcoli mentali di rischio e probabilità, nella gamma delle improbabilità che sono utili nella vita umana. Ciò significa rischi dell'ordine, diciamo, di essere infilzati da un bisonte se gli tiriamo una freccia, di essere colpiti da un fulmine se cerchiamo riparo sotto un albero isolato durante un temporale, o di annegare se cerchiamo di attraversare un fiume a nuoto. Questi rischi accettabili sono commensurati alla durata di alcuni decenni della nostra vita. Se noi fossimo biologicamente capaci di vivere per un milione di anni, e volessimo riuscirci, dovremmo valutare i rischi in modo alquanto diverso. Dovremmo prendere l'abitudine, per esempio, di non attraversare strade, perché attraversando una strada ogni giorno per mezzo milione di anni finiremmo con l'essere sicuramente investiti.

L'evoluzione ha dotato il nostro cervello di una coscienza soggettiva del rischio e dell'improbabilità adatta a creature che hanno una durata di vita di meno di un secolo. I nostri progenitori hanno sempre dovuto prendere decisioni implicanti rischi e probabilità, e la selezione naturale ha perciò equipaggiato il nostro cervello perché fosse in grado di stimare le probabilità contro lo sfondo della breve durata di vita che noi possiamo in ogni caso attenderci. Se, su qualche pianeta, esistono esseri con una vita media di un milione di secoli, il fascio di luce del rischio comprensibile si estenderà per loro molto di più verso l'estremo destro del continuo. Essi si attenderanno di ricevere di tanto in tanto un seme completo a bridge e non si daranno certo la pena di scriverlo a casa quando gli succederà. Ma anche loro faranno un salto all'indietro se una statua farà un cenno con la mano, poiché si dovrebbe vivere vari dealioni di anni più a lungo di quanto essi non vivano per poter vedere un miracolo di tale grandezza.

Che cosa ha a che fare tutto questo con le teorie sull'origine della vita? Abbiamo cominciato questo ragionamento accettando la tesi che la teoria di Cairns-Smith, e quella del brodo organico primordiale, ci sembrano un po' stiracchiate e improbabili.

Ci sentiamo naturalmente inclini a rifiutare per questa ragione tali teorie. Ma il nostro cervello, lo ricordiamo, è dotato di una percezione del rischio comprensibile che è solo un fascio di luce sottile come un tratto di matita che illumina l'estremo sinistro più lontano del continuo matematico dei rischi calcolabili. Il nostro giudizio soggettivo di quella che sembra una buona scommessa non è adeguato a giudicare in questo caso quale sia veramente una buona scommessa. Un alieno dalla durata di vita di un milione di secoli avrebbe un giudizio soggettivo del tutto diverso. Egli giudicherebbe infatti del tutto plausibile un evento, come l'origine della prima molecola replicante qual è postulata da una qualche teoria chimica, che noi, equipaggiati dall'evoluzione a muoverci in un mondo della durata di pochi decenni, giudicheremmo un miracolo sorprendente. Come possiamo decidere quale punto di vista è quello giusto, il nostro o quello dell'alieno dalla vita lunghissima? Esiste una risposta semplice a questa domanda. Il punto di vista dell'alieno dalla lunga vita è quello giusto per giudicare la plausibilità di una teoria come quella di Cairns-Smith o come quella del brodo organico primordiale. Questo perché quelle due teorie postulano un evento particolare - l'origine spontanea di un'entità autoduplicantesi - in grado di verificarsi solo una volta in un miliardo di anni. Un miliardo e mezzo di anni è press'a poco il tempo trascorso fra l'origine della Terra e i primi fossili simili a batteri. Per il nostro cervello, la cui consapevolezza temporale si estende solo alla durata di decenni, un evento che si verifica solo una volta in un miliardo di anni è così raro da sembrare un vero miracolo. Per l'alieno dalla vita molto lunga, invece, esso sembrerà molto meno un miracolo di quanto possa sembrarlo a noi una buca del golf in un solo colpo, e probabilmente ognuno di noi conosce qualcuno che conosce qualcuno che ha fatto una buca con un colpo solo. Nel giudicare le teorie sull'origine della vita, la scala di tempo soggettiva dell'alieno dalla vita lunghissima è quella pertinente, perché è press'a poco la stessa scala di tempo in cui si

colloca l'origine della vita.

Il nostro giudizio soggettivo sulla plausibilità di una teoria sull'origine della vita è probabilmente sbagliato di un fattore di un centinaio di milioni.

In realtà il nostro giudizio soggettivo ha probabilmente un margine di errore ancora più grande. Non solo il nostro cervello è attrezzato dalla natura per stimare rischi di cose che si concludono in un breve lasso di tempo; ma è predisposto anche a valutare il rischio di cose che accadono a noi personalmente, o a una cerchia ristretta di persone di nostra conoscenza. Ciò si deve al fatto che il nostro cervello non si sviluppò certo in condizioni dominate dai mezzi di comunicazione di massa. La conseguenza delle comunicazioni di massa è che, se accade qualcosa di improbabile a qualcuno, in qualsiasi parte del mondo, noi la leggiamo sul nostro quotidiano o nel Guinness dei primati. Se un oratore, in qualche parte del mondo, invocasse pubblicamente il fulmine a colpirlo se mente, e subito il fulmine lo colpisse, noi leggeremmo sicuramente questa notizia su qualche organo di informazione e non potremmo non restarne impressionati. Ma nel mondo ci sono vari miliardi di persone a cui una coincidenza del genere potrebbe capitare, cosicché la coincidenza apparente finisce col non essere in realtà così grande come potrebbe sembrare a prima vista. Il nostro cervello è probabilmente preparato per natura a valutare i rischi che si presentano a noi stessi o a poche centinaia di persone nella piccola cerchia di villaggi collegati fra loro dal suono di tamburi, da cui i nostri progenitori si attendevano di sentire notizie. Quando leggiamo su un quotidiano di una coincidenza sorprendente accaduta a qualcuno a Valparaiso o in Virginia, ne restiamo impressionati più di quel che dovremmo. Più impressionati di un fattore di, forse, cento milioni, se questo è il rapporto fra la popolazione mondiale coperta dal nostro quotidiano e la popolazione tribale su cui il nostro cervello evoluto si «attende» di sentire notizie.

Questo «calcolo demografico» è pertinente anche per il nostro giudizio sulla plausibilità delle teorie sull'origine della vita.

Non a causa della popolazione umana sulla Terra, ma a causa della popolazione dei pianeti nell'universo, la popolazione dei pianeti in cui la vita potrebbe avere avuto origine. Questo è per l'appunto l'argomento di cui ci siamo già occupati in precedenza in questo capitolo, cosicché non occorre che ci soffermiamo oltre su di esso. Torniamo alla nostra immagine mentale di una scala graduata di eventi improbabili, con le sue coincidenze di un seme completo ricevuto in una distribuzione delle carte al bridge e della coppia di sei ottenuta in un lancio di due dadi come punti di riferimento. Su questa scala graduata di dealioni e di microdealioni segniamo i seguenti tre nuovi punti: probabilità che la vita abbia origine su un pianeta (in, diciamo, un miliardo di anni), supponendo che essa abbia origine circa una volta per sistema solare; probabilità che la vita abbia origine su un pianeta supponendo che essa abbia origine circa una volta per galassia; probabilità della vita su un pianeta scelto a caso, supponendo che essa abbia avuto origine una volta sola nell'universo. Chiamiamo questi tre punti rispettivamente il Numero del sistema solare, il Numero della galassia e il Numero dell'universo. Quale di questi tre numeri sia quello più appropriato dipenderà da quale delle tre seguenti asserzioni pensiamo che sia la più vicina alla verità:

1. La vita è sorta in un solo pianeta nell'intero universo (e quel pianeta, come abbiamo visto in precedenza, dev'essere quindi la Terra).

2. La vita è sorta su un pianeta circa per galassia (nella nostra galassia il pianeta fortunato è la Terra).

3. L'origine della vita è un evento abbastanza probabile da tendere a verificarsi circa una volta per ogni sistema solare (nel nostro sistema solare il pianeta fortunato è la Terra).

Queste tre affermazioni rappresentano tre punti di riferimento sull'unicità della vita. La reale unicità della vita risiede probabilmente in una posizione intermedia fra gli estremi rappresentati dalla proposizione 1 e dalla proposizione 3. Perché dico questo? Perché, in particolare, dovremmo escludere una quarta possibilità, che l'origine della vita sia un evento molto più probabile di quanto suggerisca la proposizione 3? Questo non è un argomento forte ma, per quel che vale, può essere esposto nel modo seguente. Se l'origine della vita fosse un evento molto più probabile di quanto è suggerito dal Numero del sistema solare, dovremmo attenderci di esserci già imbattuti in forme di vita extraterrestre, se non direttamente, almeno per radio.

Spesso qualcuno sottolinea che i chimici non hanno avuto successo nei loro tentativi di replicare l'origine spontanea della vita in laboratorio. Questo fatto viene usato come se costituisse una prova contro le teorie che quei chimici stanno tentando di verificare. In realtà, però, dovremmo preoccuparci piuttosto se dei chimici potessero ottenere tanto facilmente forme spontanee di vita in provetta. Questo perché gli esperimenti dei chimici durano per anni, non per miliardi di anni, e perché solo pochi chimici, non miliardi di chimici, sono impegnati a compiere questi esperimenti. Se l'origine spontanea della vita risultasse essere un evento così probabile da essersi verificato durante i pochi decenni-uomo in cui i chimici hanno compiuto i loro esperimenti, la vita dovrebbe essere sorta molte volte sulla Terra, e molte volte sui pianeti a distanza utile per le trasmissioni radio con la Terra.

Ovviamente tutto questo elude importanti interrogativi sul problema se i chimici siano o no riusciti a riprodurre esattamente le condizioni vigenti sulla Terra primitiva, ma, anche in questo caso, dato che non possiamo rispondere a queste domande, vale la pena di proseguire il nostro ragionamento. Se l'origine della vita fosse un evento probabile alla comune scala umana, un numero di pianeti a distanze utili per le trasmissioni radio avrebbero sviluppato una tecnologia radio da un tempo abbastanza lungo da averci permesso di captare almeno una trasmissione durante i decenni trascorsi dopo l'introduzione della radio (ricordiamo che le onde radio si propagano alla velocità di 300.000 chilometri al secondo). Esistono almeno una cinquantina di stelle a distanza utile per le comunicazioni radio, se supponiamo che un qualche loro pianeta possieda la tecnologia radio da almeno tanto tempo quanto noi. Ma mezzo secolo è solo un istante fuggevole, e sarebbe una grande coincidenza se un'altra civiltà fosse così sincronizzata con la nostra.

Se noi comprendiamo nel nostro calcolo le civiltà che potrebbero possedere una tecnologia radio da mille anni, ci saranno a distanza radio qualcosa come un milione di stelle (e un numero più o meno grande di pianeti in orbita attorno a ciascuna di esse). Se includiamo anche quelle in possesso di una tecnologia radio che potrebbe risalire a 100.000 anni fa, potrebbe essere accessibile alle comunicazioni radio con noi l'intera galassia, composta da bilioni di stelle. Ovviamente, su distanze tanto grandi i segnali radio risulterebbero molto attenuati.

Siamo pervenuti così al seguente paradosso. Se una teoria dell'origine della vita è abbastanza «plausibile» da soddisfare il nostro giudizio soggettivo di plausibilità, è «plausibile» anche per rendere ragione della scarsità di forme di vita nell'universo qual è accessibile alla nostra osservazione. Secondo questo ragionamento, la teoria che noi stiamo cercando ha finito col diventare il tipo di teoria che sembra non plausibile alla nostra immaginazione limitata, legata all'ambiente terrestre, legata a una scala temporale scandita in decenni. Viste in questa luce, tanto la teoria di Cairns-Smith quanto quella del brodo primordiale sembrano correre semmai il rischio di essere troppo plausibili! Detto tutto questo devo confessare che, in presenza di un'incertezza tanto grande nei calcoli, se un chimico riuscisse effettivamente a creare una forma di vita spontanea, io non ne sarei affatto sconcertato!

Noi non sappiamo ancora esattamente in che modo la selezione naturale abbia avuto inizio sulla Terra. Questo capitolo si è proposto il fine modesto di spiegare solo il tipo di modo in cui ciò dev'essere accaduto. Il fatto che oggi manchi una spiegazione decisamente accettata dell'origine della vita non dovrebbe certamente essere considerato un ostacolo all'accettazione dell'intera concezione del mondo darwiniana, come accade di tanto in tanto, probabilmente da parte di persone che amano credere a ciò che desiderano. Nei capitoli precedenti abbiamo eliminato altri presunti ostacoli, e nel prossimo capitolo cercheremo di sbarazzarci di un altro ancora, l'idea che la selezione naturale possa solo distruggere, e mai costruire.

VII

Evoluzione costruttiva

A volte qualcuno pensa che la selezione naturale sia una forza puramente negativa, capace di eliminare gli scherzi di natura e gli organismi mal riusciti, ma non di costruire la complessità, la bellezza e l'efficienza. Essa non si limita forse a eliminare qualcosa di ciò che già esiste, mentre un processo veramente creativo dovrebbe anche aggiungere qualcosa? Possiamo rispondere in parte a questa domanda richiamandoci all'esempio di una statua. Lo scultore non aggiunge nulla al blocco di marmo. Egli si limita solo a sottrarre, ma ciò nonostante dal blocco di marmo emerge una bella statua. Questa metafora potrebbe essere però un po' fuorviante, poiché alcune persone saltano subito alla parte sbagliata della metafora stessa - il fatto che lo scultore sia guidato nel suo lavoro da un disegno cosciente - e si lasciano sfuggire la parte importante: che lo scultore lavora per sottrazione più che addizione. Ma neppure questa parte della metafora dovrebbe essere portata troppo avanti. È vero che la selezione naturale può solo sottrarre, ma la mutazione può aggiungere. Ci sono modi in cui la mutazione e la selezione naturale, lavorando congiuntamente, nella lunga durata del tempo geologico, possono condurre a un accumulo di complessità che ha molto più in comune con l'addizione che con la sottrazione. Ci sono due modi principali in cui questo accumulo può aver luogo. Il primo va sotto il nome di «genotipi coadattati»; il secondo sotto il nome di «corse agli armamenti». I due modi, considerati superficialmente, sono piuttosto diversi l'uno dall'altro, ma sono uniti sotto le rubriche di «coevoluzione» e di «geni come ambiente per altri geni». Consideriamo innanzitutto l'idea di «genotipi coadattati». Un gene esercita il suo effetto particolare solo perché c'è una struttura esistente su cui esso può lavorare. Un gene non può influire sul cablaggio di un cervello finché non esista un cervello di cui si debbano costruire le connessioni interne. Non ci sarà un cervello con i circuiti nervosi da stabilire se non ci sarà stato prima uno sviluppo embrionale completo. E non ci sarà uno sviluppo embrionale completo se non ci sarà stato prima un intero programma di eventi chimici e cellulari, sotto l'influenza di molti altri geni e di molte altre influenze causali non genetiche.

Gli effetti particolari dei geni non sono proprietà intrinseche di quei geni. Essi sono proprietà di processi embriologici, di processi esistenti i cui particolari possono essere modificati da geni, agenti in particolari luoghi e in particolari tempi durante lo sviluppo embrionale. Abbiamo visto la dimostrazione, in forma elementare, di questo messaggio per mezzo dello sviluppo dei biomorfi del nostro programma per computer.

In un certo senso, l'intero processo dello sviluppo embrionale può essere considerato un'impresa cooperativa, condotta congiuntamente da migliaia di geni. Gli embrioni sono formati da tutti i geni attivi nell'organismo in sviluppo, l'uno in collaborazione con l'altro. Ora viene la chiave per capire in che modo si siano verificate tali collaborazioni. Nella selezione naturale, i geni vengono selezionati sempre in funzione della loro capacità di prosperare nell'ambiente in cui si trovano. Noi pensiamo spesso a questo ambiente come al mondo esterno, al mondo dei predatori e delle condizioni climatiche. Dal punto di vista del gene l'aspetto forse più importante del suo ambiente è rappresentato, però, da tutti gli altri geni che esso incontra. E dov'è che un gene «incontra» altri geni? Per lo più nelle cellule dei successivi corpi individuali in cui viene a trovarsi. Ogni gene viene selezionato in funzione della sua capacità di collaborare con successo con la popolazione di altri geni che è probabile che esso incontri nei corpi.

La vera popolazione di geni, che costituisce l'ambiente in cui ogni gene dato si trova a operare, non è solo la collezione di geni che è venuta a trovarsi temporaneamente riunita nelle cellule di ogni particolare corpo individuale. Almeno in specie che si riproducono sessualmente, una tale popolazione è l'insieme di tutti i geni nella popolazione di individui interfecondi: il «pool» genico. In ogni momento dato, in una cellula di un individuo deve trovarsi ogni copia particolare di un gene, nel senso di una particolare collezione di atomi. Ma quell'insieme particolare di atomi che costituisce ciascuna copia di un gene non presenta un interesse permanente. Esso ha infatti una speranza di vita che si misura solo in mesi. Come abbiamo già avuto occasione di vedere, il gene di lunga vita come unità evolutiva non è una qualsiasi particolare struttura fisica bensì l'informazione

testuale d'archivio che viene trasmessa lungo la sequenza delle generazioni. Questo replicatore testuale ha un'esistenza distribuita. Esso è ampiamente disseminato nello spazio fra diversi individui e ampiamente ripartito nel tempo su molte generazioni. Quando si consideri la situazione in questo modo distribuito, si può dire che un qualsiasi gene ne «incontri» un altro quando essi si trovano assieme a dividersi un corpo. Il gene può «attendarsi» di incontrare una varietà di altri geni in corpi diversi in tempi diversi nella sua esistenza distribuita e nel suo cammino attraverso il tempo geologico. Un gene che ha successo sarà un gene che si comporterà in modo efficiente negli ambienti forniti dagli altri geni che incontrerà probabilmente in una quantità di corpi diversi. «Comportarsi in modo efficiente» in tali ambienti equivarrà a «collaborare» con quegli altri geni. È questa una situazione che si osserva nel modo più diretto nel caso delle vie biochimiche.

Le vie biochimiche sono sequenze di sostanze chimiche che costituiscono fasi successive in un qualche processo utile, come la liberazione di energia o la sintesi di una sostanza importante. Ogni passo nella sequenza ha bisogno di un enzima, una di quelle grandi molecole che hanno una forma tale da poter operare come una macchina in uno stabilimento chimico. Diversi enzimi si richiedono per poter eseguire le operazioni associate ai vari punti del percorso biochimico. A volte due o più percorsi chimici alternativi conducono alla stessa meta. Benché entrambi i percorsi sfocino nello stesso risultato utile, essi pervengono alla stessa meta passando per fasi intermedie diverse, e normalmente hanno anche punti di partenza diversi. Una o l'altra delle due vie alternative consentiranno di ottenere lo stesso risultato, e non importa quale delle due venga usata. La cosa importante, per ogni particolare animale, è quella di evitare di tratto di simboli codificati, come un file in un disco di computer; e i geni possono essere copiati in parti diverse dei cromosomi, esattamente come i file possono essere copiati in parti diverse di un disco. Sul mio disco che contiene questo capitolo ci sono ufficialmente solo tre file. Con la parola «ufficialmente» intendo dire che il sistema operativo del computer mi dice che ci sono solo tre file. Io posso chiedergli di leggermene uno, e il computer mi presenta un ordinamento unidimensionale di caratteri alfabetici, compresi i caratteri che tu ora stai leggendo. Il tutto, in apparenza, molto preciso e ordinato. In realtà, però, sul disco stesso la disposizione del testo è tutt'altro che precisa e ordinata. Possiamo rendercene conto se rinunciamo alla disciplina del sistema operativo ufficiale del computer e scriviamo un nostro programma privato per decifrare che cosa si trova scritto in realtà in ogni sezione del disco. Risulta allora che frammenti di ciascuno dei miei tre file sono in realtà disseminati sull'intera superficie del disco, inframmezzati l'uno all'altro e a frammenti di vecchi file, ormai defunti, che io ho cancellato molto tempo fa e che avevo dimenticato. Ogni frammento dato può saltar fuori, identico parola per parola, o con soltanto piccole differenze, in una mezza dozzina di posti diversi in tutto il disco.

La ragione di questo stato di cose è interessante e merita una digressione perché fornisce una buona analogia genetica. Quando si dice a un computer di cancellare un file, sembra che esso ci ubbidisca. In realtà esso non cancella il testo di quel file ma solo tutti i puntatori (pointers) per quel file. È un po' come se un bibliotecario cui fosse stato ordinato di eliminare *L'amante di Lady Chatterley* si limitasse a togliere la scheda dal catalogo, lasciando il libro sullo scaffale. Per il computer questo è un modo perfettamente economico di fare le cose, perché lo spazio occupato in precedenza dal file «cancellato» diventa automaticamente disponibile per la registrazione di nuovi file non appena i puntatori del vecchio file sono stati eliminati. Sarebbe in realtà uno spreco di tempo darsi la pena di riempire lo spazio con dei vuoti. Il vecchio file non andrà realmente perduto finché tutto il suo spazio non sarà stato utilizzato per memorizzarvi nuovi file.

Questa riutilizzazione dello spazio avviene però a pezzi e bocconi. I nuovi file non hanno esattamente le stesse dimensioni dei vecchi. Quando il computer registra un nuovo file su un disco, cerca il primo frammento di spazio disponibile, scrive in esso tutta la parte del file che può esservi contenuta, dopo di che cerca un altro frammento di spazio disponibile, ne scrive un altro po', e così via, finché tutto il file è scritto da qualche parte sul disco. Noi abbiamo l'illusione che il file sia una singola disposizione ordinata solo perché il computer è molto preciso nel tenere annotazioni che «puntano» agli indirizzi di tutti i frammenti sparsi nel disco. Questi «puntatori» sono come le indicazioni «continua a pagina 12» usate nei quotidiani o nei settimanali. La ragione per cui su un

disco si trovano molte copie di ogni frammento di un testo è che, come nel caso di tutti i miei capitoli, il testo è stato corretto e rivisto molte decine di volte e ogni intervento ha dato origine a una nuova registrazione sul disco di un testo (quasi) identico al precedente. La registrazione può essere apparentemente una registrazione dello stesso file. Ma, come abbiamo visto, il testo verrà in effetti disperso ripetutamente nei «vuoti» disponibili sul disco. Perciò copie multiple di un frammento dato del testo si possono trovare sull'intera superficie del disco, tanto più se il disco è vecchio ed è stato molto usato.

Ora, il sistema operativo del dna di una specie è veramente molto molto vecchio, e ci sono prove del fatto che, visto a lungo termine, esso si comporti in modo un po' simile a quello del computer con i file contenuti nei dischi. Una prova a sostegno di questa tesi proviene dall'affascinante fenomeno degli «introni» e degli «esoni». Nel corso dell'ultimo decennio si è scoperto che ogni «singolo» gene, nel senso di un tratto leggibile in modo continuo del testo del dna, non è memorizzato tutto in un posto. Se leggessimo realmente le lettere del codice come si presentano lungo il cromosoma (ossia, se facessimo l'equivalente di violare la disciplina del «sistema operativo»), troveremmo frammenti di «senso», chiamati esoni, separati da porzioni di «non-senso» chiamate introni. Ogni «gene» nel senso funzionale è infatti scisso in una sequenza di frammenti (esoni) separati da introni privi di senso. È un po' come se ogni esone terminasse con un'indicazione (puntatore) che dicesse «continua a pagina 12». Un gene completo è quindi composto da un'intera serie di esoni, i quali sono in realtà connessi assieme solo quando vengono letti dal sistema operativo «ufficiale» che li traduce in proteine.

Altre prove provengono dal fatto che i cromosomi sono cosparsi di vecchio testo genetico che non viene più usato, ma che dà ancora un senso riconoscibile. Per un programmatore di computer, il tipo di distribuzione di questi frammenti «genetici fossili» ricorda stranamente la distribuzione del testo sulla superficie di un vecchio disco che sia stato molto usato per la revisione e correzione di testi. In alcuni animali un'alta proporzione del numero totale di geni non viene in realtà mai letta.

Questi geni o sono completamente privi di senso o sono «geni fossili» superati.

Solo di tanto in tanto accade che fossili testuali tornino in vita, come ho sperimentato io stesso scrivendo questo libro. Un errore del computer (o, per essere onesto, potrebbe esserci stato un errore umano), mi fece «cancellare» accidentalmente il disco contenente il capitolo III. Ovviamente il testo stesso non era stato letteralmente cancellato. Tutto ciò che era stato cancellato definitivamente erano i puntatori che indicavano dove ogni «esone» cominciava e finiva. Il sistema operativo «ufficiale» non riusciva a leggere nulla, ma «ufficiosamente» io riuscii a svolgere la parte dell'ingegnere genetico ed esaminare tutto il testo sul disco. Quel che vidi fu un mosaico sconcertante di frammenti testuali, alcuni dei quali recenti, mentre altri erano antichi «fossili».

Mettendo assieme i frammenti del puzzle, potei ricostruire il capitolo. Per lo più, però, non sapevo quali frammenti fossero recenti e quali fossero fossili. La cosa non aveva però una grande importanza dato che, a prescindere da particolari minori che richiedevano una nuova revisione, le varie versioni non erano molto diverse fra loro. Almeno una parte dei «fossili», o degli «introni» superati, erano tornati in uso. Essi mi salvarono dalla situazione precaria in cui mi trovavo e mi risparmiarono il fastidio di riscrivere l'intero capitolo.

Ci sono prove del fatto che, anche in specie viventi, dei «geni fossili» tornino a volte a essere utilizzati e che ciò possa verificarsi dopo che essi sono rimasti latenti persino per un milione di anni. Se ci addentrassimo nei particolari finiremmo con l'allontanarci troppo dalla linea principale di questo capitolo, giacché il lettore ricorderà che già questa è una digressione. Il punto principale era che la capacità genetica totale di una specie può accrescersi in conseguenza della duplicazione genica. La riutilizzazione di vecchie copie «fossili» di geni esistenti è uno dei modi in cui ciò può accadere. Ci sono altri modi, più diretti, in cui dei geni possono essere copiati in parti sparse dei cromosomi, come file che vengono duplicati in parti diverse di un disco, o in dischi diversi.

Gli esseri umani hanno otto geni separati noti come geni della globina (usati fra l'altro nella produzione di emoglobina), i quali sono disposti su vari cromosomi distinti. Pare certo che tutte otto questi geni siano stati duplicati, e che risalcano in ultima analisi a un singolo gene ancestrale della globina. Circa 1100 milioni di anni fa tale gene ancestrale si duplicò, formando due geni. Noi

possiamo datare questo evento grazie a dati indipendenti sulla rapidità con cui le globine abitualmente si evolvono (vedi i capitoli V e XI). Dei due geni prodotti per mezzo di questa duplicazione originaria, uno divenne il progenitore di tutti i geni che producono l'emoglobina nei vertebrati, mentre l'altro divenne il progenitore di tutti i geni che producono mioglobine, una famiglia connessa di proteine che lavorano nei muscoli. Varie duplicazioni successive diedero origine alle cosiddette globine alfa, beta, gamma, delta, epsilon e zeta. La cosa affascinante è che noi possiamo costruire un albero genealogico completo di tutti i geni delle globine, e anche assegnare date approssimative a tutti i punti di divergenza (le globine delta e beta, per esempio, si separarono circa 40 milioni di anni fa; le globine epsilon e gamma 100 milioni di anni fa). Eppure le otto globine, che discendono da queste remote ramificazioni in lontani progenitori, sono ancora tutte presenti all'interno di ognuno di noi. Esse si duplicarono in parti diverse dei cromosomi di un progenitore, e noi le abbiamo ereditate su nostri cromosomi diversi. Nuove molecole dividono lo stesso corpo con i loro remoti cugini molecolari. È certo che una grande quantità di un tale lavoro di duplicazione è continuata, su tutti i cromosomi, e per l'intera durata del tempo geologico. Questo è un aspetto importante sotto il quale la vita reale è più complessa dei biomorfi di cui ci siamo occupati nel capitolo III. I nostri biomorfi avevano tutti solo nove geni. Essi si svilupparono per mezzo di mutamenti in quei nove geni, mai accrescendo il numero dei geni da nove a dieci. Persino negli animali reali tali duplicazioni sono abbastanza rare da non invalidare la mia affermazione generale che tutti i membri di una specie condividano lo stesso sistema di «indirizzamento» del dna. La duplicazione all'interno della specie non è l'unico mezzo attraverso il quale il numero dei geni cooperanti è cresciuto nel corso dell'evoluzione. Un'evenienza più rara, ma forse ancora molto importante, è l'occasionale incorporazione di un gene di un'altra specie, persino di una specie remotissima. Esistono, per esempio, delle emoglobine nelle radici di talune piante della famiglia dei piselli (papilionacee). Esse non compaiono in alcun'altra famiglia vegetale e pare quasi certo che siano entrate in qualche modo nella famiglia dei piselli per mezzo di un'infezione indiretta da parte di animali, forse con la mediazione di virus.

Un evento di particolare importanza lungo queste linee, secondo la teoria della biologa americana Lynn Margulis - teoria che va guadagnando sempre maggior favore -, si sarebbe verificato all'origine della cosiddetta cellula eucariotica. Le cellule eucariotiche comprendono tutte le cellule, con l'eccezione di quelle dei batteri. Il mondo vivente si divide, fondamentalmente, in batteri da un lato e tutti gli altri organismi dall'altro. Noi facciamo parte di tutti gli altri, e siamo chiamati collettivamente gli eucarioti. La nostra differenza nei confronti dei batteri consiste principalmente - a livello cellulare - nel fatto che le nostre cellule hanno nel loro interno piccole minicellule separate. Queste comprendono il nucleo, in cui sono contenuti i cromosomi; i piccoli oggetti di forma bombata noti come mitocondri (di cui ci siamo occupati fuggevolmente nella figura 1), pieni di membrane ripiegate in modo complesso; e, nelle cellule (eucariotiche) di vegetali, i cloroplasti. Mitocondri e cloroplasti hanno il loro dna, che si replica e si propaga in modo del tutto indipendente dal dna principale nei cromosomi del nucleo. Tutti i mitocondri presenti nel nostro organismo sono discesi dalla piccola popolazione di mitocondri contenuta nell'ovulo materno da cui abbiamo avuto origine. Gli spermatozoi sono troppo piccoli per contenere mitocondri, cosicché i mitocondri si trasmettono solo per linea femminile, e gli organismi di sesso maschile sono vicoli ciechi per quanto concerne la riproduzione di questi organelli. Per inciso, ciò significa che noi possiamo usare i mitocondri per ricostruire la nostra linea genealogica, seguendo rigorosamente la linea femminile. Secondo la teoria della Margulis, mitocondri e cloroplasti, e poche altre strutture all'interno delle cellule, sarebbero discesi tutti da batteri. La cellula eucariotica si formò, forse due miliardi di anni fa, quando vari ceppi di batteri unirono le loro forze in considerazione dei vantaggi che ciascuno di essi poteva ricavare dagli altri. Nel corso di miliardi di anni, tali batteri si integrarono così profondamente in quella loro unità cooperativa che divenne la cellula eucariotica, che oggi è diventato quasi impossibile trovare prove del fatto, se così fu veramente, che essi furono un tempo batteri separati.

Pare che, dopo l'invenzione della cellula eucariotica, sia divenuta possibile una grande varietà di nuove soluzioni. Il fatto più interessante dal nostro punto di vista è che le cellule poterono produrre

grandi corpi comprendenti molti miliardi di cellule.

Tutte le cellule si riproducono dividendosi in due, divisione nella quale ciascuna metà riceve un corredo completo di geni. Come abbiamo visto nel caso dei batteri che possono danzare su una capocchia di spillo, le successive divisioni possono generare un numero molto grande di cellule in un tempo piuttosto breve. Si comincia con una cellula che si divide in due. Poi ciascuna delle due si suddivide, cosicché si ha un totale di quattro, che si sdoppiano a loro volta. Con successivi raddoppiamenti si passa perciò da 8 a 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16.384... Dopo soli 20 raddoppiamenti, che non richiedono molto tempo, abbiamo già superato il milione. Dopo soli 40 raddoppiamenti il numero delle cellule è salito a più di un miliardo. Nel caso dei batteri le cellule, immensamente numerose, prodotte per mezzo di successivi raddoppiamenti se ne vanno ognuna per la sua strada. Lo stesso vale per molte cellule eucariotiche, per esempio per protozoi come le amebe. Un passo importante nell'evoluzione fu intrapreso quando cellule che erano state prodotte per mezzo di successive divisioni si unirono anziché condurre un'esistenza separata. Potè allora emergere una struttura di ordine superiore, proprio come abbiamo visto avvenire, anche se a una scala incomparabilmente più piccola, nel caso dei nostri biomorfi con nove geni.

Ora, per la prima volta, divenne possibile un corpo di grandi dimensioni. Il corpo umano è una popolazione veramente immensa di cellule, discese tutte da un progenitore, l'uovo fecondato, e tutte perciò cugine, figlie, nipoti, zie ecc. di altre cellule nel corpo. I dieci bilioni di cellule che compongono ciascuno di noi sono il prodotto di alcune decine di generazioni di raddoppiamenti di cellule. Queste cellule sono classificate in circa 210 tipi diversi (a seconda dei gusti), tutti costituiti dallo stesso corredo di geni, ma con geni diversi attivati in tipi di cellule diversi.

Ecco perché, come abbiamo visto, le cellule epatiche sono diverse dalle cellule cerebrali, e perché le cellule delle ossa sono diverse dalle cellule dei muscoli.

I geni che operano attraverso gli organi e i modelli di comportamento di corpi pluricellulari possono conseguire metodi per assicurare la loro propagazione che non sono disponibili a singole cellule che lavorino individualmente. Un corpo pluricellulare dà ai geni la possibilità di manipolare il mondo, usando strumenti su una scala di grandezza molte volte superiore a quella di singole cellule. I geni riescono a mettere in atto queste manipolazioni indirette su vasta scala attraverso i loro effetti più diretti alla scala in miniatura delle cellule. Per esempio, essi modificano la forma della membrana plasmatica delle cellule.

Le cellule interagiscono allora fra loro in popolazioni immense per produrre effetti di gruppo su vasta scala come un braccio o una gamba o (più indirettamente) una diga di un castoro. La maggior parte delle proprietà di un organismo che noi possiamo osservare a occhio nudo sono proprietà cosiddette «emergenti». Persino i biomorfi creati dal nostro programma di computer, con i loro nove geni, avevano proprietà emergenti. Negli animali reali queste proprietà vengono prodotte al livello dell'intero organismo da interazioni fra cellule. Un organismo opera come un'intera unità, e si può dire che i suoi geni abbiano effetti a livello dell'intero organismo, anche se ciascuna copia di ciascun gene esercita i suoi effetti immediati solo all'interno della propria cellula.

Abbiamo visto che una parte molto importante dell'ambiente di un gene è costituita dagli altri geni con cui è probabile che esso si incontri in altri corpi al passare delle generazioni. Questi sono i geni che vengono permutati e combinati all'interno della specie. Una specie che si riproduce sessualmente può essere concepita in effetti come un dispositivo che permuta in combinazioni diverse una serie discreta di geni abituati a cooperare fra loro. Le specie, secondo questa concezione, rimescolano di continuo collezioni di geni che si incontrano fra loro all'interno della specie ma che non si incontrano mai con geni di altre specie. C'è però un senso in cui geni di specie diverse, anche se non si incontrano mai a breve distanza all'interno di cellule, costituiscono nondimeno una parte importante del reciproco ambiente. Il loro rapporto è più spesso ostile che cooperativo, ma questo fatto può essere considerato semplicemente alla stregua di un'inversione di segno. Perveniamo così al secondo tema principale di questo capitolo, quello delle «corse agli armamenti». Ci sono corse agli armamenti fra predatori e prede, fra parassiti e ospiti e addirittura - anche se questo punto è più sottile, e io non mi soffermerò ulteriormente su di esso - fra maschi e

femmine all'interno di una stessa specie.

Le corse agli armamenti decorrono nel tempo dell'evoluzione, più che alla scala di tempo della vita individuale. Esse consistono in miglioramenti dell'equipaggiamento della propria linea genealogica (per esempio degli animali prede) per poter sopravvivere, come diretta conseguenza di miglioramenti dell'equipaggiamento in un'altra linea genealogica (per esempio dei predatori). Si verificano «corse agli armamenti» ogni volta che degli individui hanno nemici che hanno uguale capacità di miglioramento evolutivo. Io attribuisco alle corse agli armamenti la massima importanza perché sono state in gran parte tali competizioni a introdurre nell'evoluzione il suo carattere «progressivo». Contrariamente a pregiudizi diffusi in passato, infatti, nell'evoluzione non c'è niente di intrinsecamente progressivo.

Possiamo rendercene conto se consideriamo che cosa sarebbe accaduto qualora gli unici problemi che gli animali dovevano affrontare fossero stati quelli posti dal clima e da altri aspetti dell'ambiente non vivente.

Dopo molte generazioni di selezione cumulativa in un luogo particolare, gli animali e le piante locali diventano ben adattati alle condizioni ivi vigenti, per esempio alla meteorologia. Se fa freddo, gli animali e le piante sviluppano un'epidermide coriacea o cerea per non dissipare la piccola quantità d'acqua disponibile. Gli adattamenti alle condizioni locali influiscono su ogni parte del corpo, sulla sua forma e sul suo colore, sui suoi organi interni, sul suo comportamento e sulla chimica nelle sue cellule.

Se le condizioni in cui una linea genealogica di animali vive rimangono costanti - per esempio se il clima è secco e se è rimasto tale senza interruzioni per cento generazioni - è probabile che l'evoluzione in quella linea genealogica si arresti, almeno per quanto concerne l'adattamento alla temperatura e all'umidità. Gli animali diventeranno in tal modo così ben adattati alle condizioni locali quanto è possibile esserlo. Ciò non significa che non potrebbero essere riprogettati continuamente per esserlo ancora di più, bensì che non possono migliorare il loro adattamento per mezzo di passi evolutivi piccoli (e perciò probabili): nessuno dei loro vicini immediati nell'equivalente locale dello «spazio dei biomorfi» potrebbe fare molto meglio.

L'evoluzione si arresterà finché non si avrà un mutamento nelle condizioni: l'inizio di un'epoca glaciale, un mutamento nella piovosità media in quell'area, un mutamento nei venti prevalenti. Mutamenti del genere si verificano quando ci occupiamo di una scala temporale così lunga come quella dell'evoluzione. Di conseguenza l'evoluzione normalmente non si arresta, ma segue costantemente i mutamenti ambientali. Se nella temperatura media in una certa area si verifica un calo costante, destinato a persistere per vari secoli, varie generazioni successive di animali saranno spinte da una «pressione» selettiva costante nella direzione, per esempio, di sviluppare un pelo più lungo. Se, dopo qualche migliaio di anni di temperatura ridotta, si verifica un'inversione di tendenza e le temperature riprendono a salire, gli animali saranno sottoposti a una nuova pressione selettiva, e tenderanno di nuovo a sviluppare un pelo più corto.

Finora abbiamo considerato però solo una parte limitata dell'ambiente, ossia la meteorologia. Il tempo meteorologico è molto importante per animali e piante. Esso è soggetto a mutare al passare dei secoli, mantenendo in tal modo l'evoluzione in continuo movimento per tener dietro ai mutamenti. Ma il tempo cambia in modo irregolare, capriccioso. Ci sono altre parti dell'ambiente di un animale che cambiano in modo più costantemente ostile, e anche in questo caso gli animali devono «tener dietro» al mutamento. Queste parti dell'ambiente sono costituite dagli organismi viventi stessi. Per un predatore come una iena, una parte del suo ambiente che è almeno altrettanto importante quanto le condizioni meteorologiche sono le sue prede, le mutevoli popolazioni di gnu, zebre e antilopi. Per le antilopi e per gli altri erbivori che vagano nelle pianure alla ricerca di erba, le condizioni del tempo possono essere importanti, ma lo sono anche i leoni, le iene e altri carnivori. La selezione cumulativa mirerà a far sì che gli animali siano ben adattati al compito di battere nella corsa i loro predatori o di superare in astuzia le loro prede, non meno di quanto ha cura di fare in modo che essi siano ben adatti alle condizioni meteorologiche predominanti. E, come l'evoluzione «tiene dietro» alle fluttuazioni a lungo termine della meteorologia, così anche i mutamenti a lungo termine nelle abitudini o nelle armi dei predatori saranno seguiti da mutamenti evolutivi nelle loro

prede. E viceversa, naturalmente.

Possiamo usare l'espressione generale «nemici» di una specie per significare altri organismi viventi che lavorano per renderle dura la vita. I leoni sono nemici delle zebre. Potrebbe sembrare un po' cinico dire che «le zebre sono nemiche dei leoni». Il ruolo della zebra in questo rapporto sembra troppo innocente per meritare l'appellativo di «nemico», con la sua connotazione di ostilità, tanto più che la zebra non è altro che una vittima. Le singole zebre fanno però tutto ciò che è in loro potere per resistere al desiderio dei leoni di mangiarle, e questa loro resistenza è qualcosa che rende senza dubbio più dura la vita dei leoni. Se le zebre e altri erbivori di grossa taglia avessero successo nel tentativo di sottrarsi ai leoni, questi sarebbero condannati a morire di fame. Così, nella nostra definizione, le zebre sono nemiche dei leoni. Parassiti come le tenie sono nemici dei loro ospiti, e gli ospiti sono nemici dei parassiti, in quanto tendono a evolvere misure per resistere loro. Gli erbivori sono nemici delle piante, e le piante sono nemiche degli erbivori, producendo spine e sostanze chimiche velenose o dal sapore sgradevole.

Le linee genealogiche di animali e piante «tengono dietro» ai mutamenti dei loro nemici - nei tempi lunghi dell'evoluzione in modo non meno assiduo di quello in cui seguono i mutamenti nelle condizioni meteorologiche medie. I miglioramenti evoluzionistici nelle armi e nella tattica dei ghepardi sono paragonabili, dal punto di vista delle gazzelle, a un costante peggioramento del clima, e vengono quindi seguiti nello stesso modo. Fra i due sviluppi c'è però una differenza di importanza enorme. Il tempo cambia nel corso dei secoli, ma non cambia in un modo specificamente malevolo. Esso non «dà la caccia» alle gazzelle. Il ghepardo medio cambierà nel corso dei secoli, esattamente come la media della piovosità annuale. Mentre però le precipitazioni annuali medie aumenteranno e diminuiranno in modo irregolare, senza una particolare ragione apparente, il ghepardo medio tenderà, al passare dei secoli, a essere sempre meglio equipaggiato dei suoi progenitori in vista del compito di dar la caccia alle gazzelle. Questo perché la successione dei ghepardi, a differenza della successione delle condizioni meteorologiche annuali, è soggetta essa stessa a una selezione cumulativa. I ghepardi tenderanno a diventare più veloci nella corsa, ad avere uno sguardo più acuto, a sviluppare zanne più aguzze. Per quanto le condizioni meteorologiche e altre condizioni della natura inanimata possano sembrare «ostili», esse non hanno una tendenza necessaria a diventare costantemente più ostili. I nemici vivi, visti alla scala di tempo dell'evoluzione, hanno invece esattamente tale tendenza.

La tendenza dei carnivori a «migliorare» progressivamente si arresterebbe ben presto, come avviene per la corsa agli armamenti fra le nazioni umane (a causa dei costi economici immani che si dovrebbero altrimenti sopportare), se non fosse per l'esistenza di una tendenza parallela nelle prede. E viceversa.

Anche le gazzelle, non meno dei ghepardi, sono soggette a una selezione cumulativa, e anch'esse tenderanno, al passare delle generazioni, a migliorare la loro abilità nella corsa, a reagire rapidamente a ogni segnale di pericolo, a rendersi invisibili nascondendosi nell'erba alta. Anch'esse sono capaci di evolversi nella direzione di diventare nemici più efficienti, in questo caso nemici dei ghepardi. Dal punto di vista dei ghepardi la temperatura annuale media non migliora o peggiora sistematicamente al passare degli anni, se si prescinde dal fatto che, per un animale ben adattato, ogni mutamento finisce con l'essere un mutamento in peggio. La gazzella annuale media tende invece a «peggiore» sistematicamente: a diventare più difficile da catturare, essendo meglio adatta al compito di sottrarsi ai ghepardi. Anche in questo caso, la tendenza verso un miglioramento progressivo nelle gazzelle si rallenterebbe sino ad arrestarsi, se non fosse per la tendenza parallela al miglioramento presentata dai loro predatori. Una delle parti migliora proprio in conseguenza del fatto che è migliorata l'altra parte. E viceversa. Il processo continua in una spirale viziosa a una scala di tempo di centinaia di migliaia di anni.

Nel mondo delle nazioni, alla loro scala di tempo più breve, quando due nemici migliorano progressivamente i loro arsenali l'uno in risposta ai miglioramenti dell'altra parte, parliamo di «corsa agli armamenti». Il meccanismo di ciò che si verifica nell'evoluzione degli organismi viventi è abbastanza simile da giustificare l'uso della stessa espressione, e io non farò alcun tentativo di legittimarlo agli occhi dei miei pomposi colleghi che vorrebbero purgare il nostro linguaggio da

immagini così illuminanti anche se improprie. Io ho introdotto qui l'idea nei termini di un semplice esempio: gazzelle e ghepardi. Il mio intento era di far capire l'importante differenza che esiste fra un nemico vivo, soggetto esso stesso al mutamento evolutivo, e una condizione inanimata non malevola come le condizioni meteorologiche, le quali sono sì soggette al mutamento, ma non a un mutamento sistematico, evolutivo. È venuto però il momento di ammettere che, nei miei sforzi per spiegare quest'unico punto valido, potrei avere sviato il lettore sotto altri aspetti. È ovvio, se ci si riflette un istante, che il quadro da me tratteggiato di una corsa costante agli armamenti è, almeno sotto un certo aspetto, troppo semplicistico. Consideriamo la velocità nella corsa. Nei termini in cui ho prospettato il problema, l'idea della corsa agli armamenti sembra suggerire che ghepardi e gazzelle avrebbero dovuto proseguire la loro evoluzione, una generazione dopo l'altra, fino a raggiungere gli uni e le altre una velocità supersonica. Ciò non si è verificato e non si verificherà mai. Prima di riprendere la discussione delle corse agli armamenti, è mio dovere tentare di scongiurare ogni possibile malinteso.

La prima precisazione è la seguente. Ho dato l'impressione di una continua scalata nell'abilità dei ghepardi nel catturare prede, e nell'abilità delle gazzelle nel sottrarsi ai predatori. Il lettore potrebbe averne ricavato un'idea vittoriana dell'inesorabilità del progresso, in cui ogni generazione è migliore, più bella e più coraggiosa rispetto alla precedente. La realtà naturale è molto diversa. La scala di tempo alla quale sono riscontrabili miglioramenti significativi è, in ogni caso, troppo lunga perché il miglioramento possa essere percepito attraverso il confronto di una generazione con la precedente o la successiva. Il «miglioramento», inoltre, è tutt'altro che continuo. È un processo che procede a scossoni e che, anziché muovere costantemente «in avanti» nella direzione suggerita dall'idea della corsa agli armamenti, comprende talvolta anche periodi di ristagno o addirittura di «regresso». I mutamenti nelle condizioni del tempo, i mutamenti nelle forze inanimate che ho raccolto nella categoria generale delle variazioni «meteorologiche», potrebbero benissimo occultare le tendenze lente e irregolari della corsa agli armamenti. Potrebbero darsi lunghe estensioni di tempo in cui non si verifica alcun «progresso» nella corsa agli armamenti, e forse nessun mutamento evolucionistico in generale. Le corse agli armamenti culminano talvolta nell'estinzione di una specie, dopo di che può ricominciare dal principio una nuova corsa agli armamenti. Nondimeno, una volta detto tutto questo, l'idea della corsa agli armamenti rimane la spiegazione di gran lunga più soddisfacente per l'esistenza dei meccanismi avanzati e complessi posseduti da animali e piante. Il «miglioramento» progressivo del tipo suggerito dall'immagine della corsa agli armamenti continua, per quanto in modo irregolare e con interruzioni, anche se la componente netta del progresso è troppo lenta da poter essere percepita nell'arco della vita di un uomo, o persino nell'intervallo di tempo della storia registrata.

La seconda precisazione è che il tipo di rapporto che io designo con la parola «nemico» è più complicato di quanto non risulti dal semplice rapporto bilaterale suggerito dall'esempio dei ghepardi e delle gazzelle. Una complicazione consiste nel fatto che una specie data può avere due (o più) nemici, i quali possono essere nemici ancora più violenti l'uno dell'altro. Questo è il principio che si cela dietro la mezza verità comunemente espressa che l'erba trae beneficio dall'essere brucata (o falciata). I bovini mangiano l'erba, e potrebbero perciò essere considerati nemici dell'erba. Ma le erbe (le graminacee) hanno altri nemici anche nel mondo vegetale, come per esempio erbacce competitive, le quali, se lasciate crescere senza controllo, potrebbero risultare per le erbe nemici ancora peggiori dei bovini. Le graminacee soffrono qualche svantaggio dall'essere brucate dai bovini, ma le erbacce competitive ne soffrono ancora di più. Perciò l'effetto netto del pascolo di bovini su un prato si risolve in un beneficio per le graminacee. I bovini risultano essere, in questo senso, amici delle graminacee più che loro nemici.

I bovini sono nondimeno nemici delle graminacee nel senso che, ciò nonostante, è vero che una singola pianta avrebbe un vantaggio maggiore dal non essere mangiata da un bovino che dall'essere mangiata, e che ogni pianta mutante la quale possedesse, diciamo, un'arma chimica che la proteggesse contro i bovini, riuscirebbe a produrre più semi (contenenti istruzioni genetiche per produrre l'arma chimica) di membri rivali della propria specie che fossero più graditi al palato dei bovini stessi.

Anche se c'è un senso speciale in cui i bovini sono «amici» delle graminacee, la selezione naturale non favorisce le singole piante di graminacee che vengono mangiate dai bovini! La conclusione generale di questo paragrafo è la seguente. Può essere conveniente pensare a una corsa agli armamenti fra due linee genealogiche come bovini e graminacee, o come gazzelle e ghepardi, ma non dovremmo mai perdere di vista il fatto che le due parti hanno anche altri nemici contro i quali stanno conducendo simultaneamente altre corse agli armamenti. Io non proseguirò qui oltre questo ragionamento, ma esso può essere sviluppato in una delle spiegazioni per cui certe particolari corse agli armamenti si stabilizzano e non procedono per sempre, fino a produrre predatori in grado di incalzare le loro prede alla velocità di Mach 2 e così via.

La terza «precisazione» per meglio definire il nostro concetto di corsa agli armamenti non è tanto una limitazione quanto un'osservazione interessante di per sé. Nella mia discussione ipotetica dell'esempio dei ghepardi e delle gazzelle, dissi che i ghepardi, a differenza delle condizioni meteorologiche, hanno la tendenza a migliorare di continuo al passare delle generazioni, diventando «cacciatori migliori», nemici più efficienti meglio equipaggiati in vista del compito di uccidere gazzelle. Il nocciolo dell'idea della corsa agli armamenti è che, in questa gara per raggiungere un'efficienza sempre maggiore, entrambe le parti migliorano dal proprio punto di vista, rendendo simultaneamente più difficile la vita alla controparte. Non c'è alcuna ragione particolare (o almeno non ce ne alcuna in nulla di ciò che abbiamo discusso finora) per attenderci che una delle due parti possa avere costantemente un successo maggiore o minore dell'altra. In effetti l'idea della corsa agli armamenti, nella sua forma più pura, suggerisce appunto che non dovrebbe verificarsi assolutamente alcun progresso nella percentuale di successo a favore dell'una delle due parti, mentre c'è un progresso molto preciso nell'equipaggiamento per il successo da entrambe le parti. I predatori diventano meglio equipaggiati in vista del compito di uccidere, ma al tempo stesso le prede diventano meglio equipaggiate al fine di evitare di essere uccise, cosicché il risultato netto è che non si verifica nessun mutamento nella percentuale dei successi nella caccia.

La conclusione implicita è che se, per mezzo di una macchina del tempo, i predatori di un'epoca potessero trovarsi di fronte a prede di un'altra epoca, gli animali posteriori, più «moderni», fossero essi predatori o prede, avrebbero facilmente ragione dei loro antagonisti, meno evoluti. Questo è un esperimento che non potremo mai fare, anche se qualcuno suppone che certe faune remote e isolate, come quelle dell'Australia e del Madagascar, potrebbero essere considerate equivalenti a faune del passato, come se un viaggio in Australia fosse paragonabile a un viaggio a ritroso compiuto con l'aiuto di una macchina del tempo. Tali persone pensano che le specie australiane native siano di solito condannate all'estinzione per opera di competitori o nemici superiori introdotti dall'esterno, essendo modelli «più antiquati», «superati», una condizione simile a quella in cui si troverebbe uno degli incrociatori che parteciparono alla battaglia dello Jutland se dovesse trovarsi di fronte a un moderno sottomarino nucleare. Ma l'assunto che l'Australia abbia una fauna «fossile vivente» è difficile da giustificare. Forse si potrebbero addurre buoni argomenti a sostegno di questa tesi, ma in realtà ciò avviene molto di rado. Io credo che questa tesi non sia molto di più di un equivalente zoologico di uno snobismo sciovinistico, analogo all'atteggiamento di chi vede in ogni australiano un rozzo vagabondo con ben poco sale in zucca.

Il principio dell'assenza di un miglioramento complessivo nel successo di una specie sull'altra, per quanto sia grande il progresso negli equipaggiamenti, ha ricevuto dal biologo americano Leigh van Valen il nome memorabile di «effetto della Regina Rossa». In Attraverso lo specchio, come il lettore ricorderà, la Regina Rossa prende Alice per mano e la trascina attraverso la campagna in una corsa sempre più rapida, ma per quanto velocemente esse corrano si trovano sempre nello stesso posto. Alice, comprensibilmente sconcertata, dice: «Nel nostro paese, se si corre velocemente per lungo tempo, generalmente si arriva da qualche altra parte». «Un paese lento!» dice la regina. «Qui vedi, puoi correre quanto vuoi e ti ritrovi sempre allo stesso posto. Se vuoi arrivare da qualche altra parte devi correre almeno due volte più veloce di così!» Il nome di «effetto della Regina Rossa» è divertente, ma può essere sviante se lo si intende (come avviene talvolta) nel senso di qualcosa di matematicamente preciso, ossia letteralmente nel senso di un progresso relativo zero. Un altro elemento sviante è che, nella storia di Alice, l'affermazione della Regina Rossa è autenticamente

paradossale, inconciliabile col buon senso nel mondo fisico reale. Ma l'effetto evolutivo della Regina Rossa enunciato da van Valen non è affatto paradossale. Esso è del tutto in accordo col buon senso, purché il buon senso sia applicato con intelligenza. Ma anche se non sono paradossali, le corse agli armamenti possono dare origine a situazioni che colpiscono come uno spreco l'intelligenza umana, orientata verso l'economia.

Perché, per esempio, gli alberi nella foresta sono così alti? La risposta più sbrigativa è che tutti gli altri alberi sono alti, cosicché nessun albero può permettersi di non esserlo. In questo caso, infatti, gli altri alberi gli impedirebbero di emergere alla luce del Sole. Questa è sostanzialmente la verità, ma essa offende il modo di pensare economico dell'uomo. Sembra tutto così inutile, così dispendioso. Quando tutti gli alberi raggiungono l'altezza della volta del fogliame della foresta, sono tutti esposti in modo press'a poco uguale al Sole, e nessuno potrebbe permettersi di essere più piccolo. Ma se tutti fossero più piccoli, se potesse esserci fra loro una sorta di accordo sindacale per abbassare l'altezza riconosciuta della volta del fogliame nella foresta, tutti gli alberi ne trarrebbero beneficio. Essi sarebbero pur sempre in concorrenza fra loro nella volta del fogliame per assicurarsi esattamente la stessa esposizione alla luce del Sole, ma avrebbero costi di crescita molto minori per emergere nella volta. L'economia totale della foresta ne avrebbe beneficio, e lo stesso vale per ogni singolo albero. Purtroppo la selezione naturale non si cura di economie totali e non concede alcuno spazio a cartelli e accordi economici. Nella foresta c'è stata sempre una corsa agli armamenti, in conseguenza della quale gli alberi sono divenuti più alti al passare delle generazioni. In ogni fase della corsa agli armamenti l'unico vantaggio nell'essere alti è stato nell'essere relativamente più alti rispetto agli alberi vicini.

Man mano che si inaspriva la corsa agli armamenti, aumentava l'altezza media degli alberi nella volta del fogliame nella foresta. Non aumentava però il beneficio che gli alberi ricavano dal fatto di essere alti. In realtà esso diminuiva a causa dell'aumento dei costi dell'accrescimento. Gli alberi delle successive generazioni diventavano sempre più alti, ma in definitiva avrebbero potuto avere un maggiore vantaggio dal restare al punto di partenza. A questo punto si situa, dunque, la connessione con Alice e la Regina Rossa, ma si può vedere che nel caso degli alberi non ci troviamo di fronte a un vero paradosso. È tipico in generale delle corse agli armamenti, comprese quelle umane, che, anche se sarebbe stato meglio che nessuno avesse dato inizio all'escalation, una volta che qualcuno l'abbia avviata nessuno può permettersi di non tenerle dietro. Ancora una volta, per inciso, dovrei sottolineare che ho presentato l'argomentazione in termini troppo semplici. Non intendo suggerire che in ogni generazione gli alberi siano sistematicamente più alti che nella generazione precedente, né che la corsa agli armamenti continui necessariamente ancora.

Un altro punto illustrato dagli alberi è che le corse agli armamenti non devono essere necessariamente fra membri di specie diverse. I singoli alberi sono soggetti a ricevere lo stesso danno da alberi più alti, che li sottraggano all'esposizione alla luce solare, tanto che tali alberi appartengano a specie diverse quanto alla propria specie. Probabilmente il danno è addirittura maggiore in quest'ultimo caso poiché tutti gli organismi sono più seriamente minacciati dalla competizione all'interno della propria specie che da quella con membri di altre specie. I membri di una specie sono infatti in competizione fra loro per le stesse risorse, in modo più preciso di quanto non avvenga con i membri di altre specie. All'interno di una specie ci sono corse agli armamenti anche fra ruoli maschili e ruoli femminili, e fra ruoli parentali e filiali. Mi sono occupato di questi argomenti nel Gene egoista e non intendo quindi riprenderli qui.

L'esempio degli alberi mi permette di introdurre qui un'importante distinzione generale fra due tipi di corsa agli armamenti, designate come simmetriche e asimmetriche. Una corsa agli armamenti simmetrica è quella fra competitori che tentano di fare press'a poco la stessa cosa. Un esempio può essere fornito dagli alberi della foresta che lottano tutti per raggiungere la luce. Le diverse specie di alberi non si procurano tutte le risorse di cui hanno bisogno esattamente nello stesso modo, ma per quanto concerne il tipo particolare di gara di cui stiamo parlando - la competizione per la luce del sole al di sopra della volta del fogliame - essi sono in concorrenza fra loro per la stessa risorsa. Essi partecipano a una corsa agli armamenti in cui il successo di una parte è sentito come un insuccesso dall'altra parte.

Questa è una corsa agli armamenti simmetrica perché la natura del successo e del fallimento delle due parti è la stessa: il raggiungimento della luce del sole e l'essere esclusi dal raggiungimento di tale obiettivo.

La corsa agli armamenti fra ghepardi e gazzelle è invece asimmetrica. Essa è una vera corsa agli armamenti in cui il successo di una parte è sentito come un insuccesso dall'altra, ma la natura del successo e del fallimento delle due parti è molto diverso.

Le due parti «tentano» di fare cose molto diverse. I ghepardi tentano di mangiare delle gazzelle. Le gazzelle non tentano di mangiare ghepardi, ma si sforzano di evitare di essere mangiate da ghepardi. Da un punto di vista evoluzionistico le corse agli armamenti asimmetriche sono più interessanti perché in esse sono maggiori le probabilità che vengano prodotti sistemi di arma molto complessi.

Possiamo vedere perché sia così prendendo esempi dalla tecnologia degli armamenti umana.

Potrei usare come esempi gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica, ma in realtà non c'è alcun bisogno di menzionare nazioni specifiche. Armi prodotte da una società di uno qualsiasi dei paesi industriali avanzati possono essere comprate da una grande varietà di nazioni. L'esistenza di un'arma offensiva efficace, come il missile Exocet, capace di sfiorare la superficie terrestre, tende a «promuovere» l'invenzione di una contromisura efficiente, per esempio un dispositivo di disturbo delle trasmissioni radio per «confondere» il sistema di controllo del missile. La contromisura viene prodotta per lo più da un paese nemico, ma potrebbe essere prodotta anche dallo stesso paese, e persino dalla stessa società! Nessuna società, dopo tutto, è più attrezzata a progettare una contromisura a un particolare missile della società che lo ha prodotto. Non c'è nulla di intrinsecamente improbabile nel fatto che una stessa società produca e venda tanto il missile quanto la sua contromisura a paesi nemici in una guerra. Io sono abbastanza scettico da sospettare che ciò si sia probabilmente verificato più di una volta nella realtà; questa situazione illustra in ogni caso vividamente l'argomento secondo cui gli equipaggiamenti migliorano mentre la loro efficacia netta rimane immutata (e i loro costi aumentano).

Dal mio punto di vista presente, la questione se i produttori che contribuiscono dalle due parti avverse alla corsa agli armamenti siano nemici fra loro o siano addirittura gli stessi non è pertinente, ed è interessante che sia così. Il fatto importante è che, a prescindere dalle società che li producono, gli ordigni bellici stessi siano nemici fra loro nel senso specifico che ho definito in questo capitolo. Il missile, e il dispositivo specifico destinato a ostacolarne un uso efficace, sono nemici fra loro nel senso che il successo dell'uno è sinonimo di insuccesso dell'altro. Se i loro progettisti siano anche nemici fra loro è cosa che non ha nessuna pertinenza col nostro ragionamento, anche se sarà probabilmente più facile supporre che lo siano.

Finora ho esaminato l'esempio del missile e della sua antiarma specifica senza insistere sull'aspetto evolutivo progressivo, che è dopo tutto la ragione principale per cui ho introdotto questo esempio in questo capitolo. Il punto che ci interessa qui è che non sono solo le caratteristiche presenti di un missile a stimolare, o a invocare, la produzione di un antidoto efficace, per esempio un dispositivo per disturbare le comunicazioni radio, ma sono anche i costanti perfezionamenti del dispositivo antimissile a provocare, a loro volta, miglioramenti nella progettazione del missile, miglioramenti che si oppongono specificamente all'azione del suo nemico, il dispositivo antimissile. È un po' come se ogni miglioramento nel missile stimolasse il successivo miglioramento in se stesso attraverso l'effetto che esso avrà sulla sua antiarma. Il miglioramento degli equipaggiamenti finisce in tal modo con l'alimentare se stesso. Questa è una ricetta per un'evoluzione esplosiva, a rotta di collo.

In capo a qualche anno di botta e risposta fra invenzioni e controinvenzioni, la versione più recente tanto del missile quanto del suo antidoto avrà conseguito un grado di complessità elevatissimo.

Eppure, al tempo stesso - ecco qui ancora l'effetto della Regina Rossa - non c'è alcuna ragione generale per attendersi che l'una o l'altra parte in questa competizione tecnologica abbia più successo nell'assolvimento dei suoi compiti di quanto ne avesse all'inizio della corsa agli armamenti. In effetti, se tanto il missile quanto l'arma antimissile sono andati migliorando con lo stesso ritmo, possiamo attenderci che le versioni più recenti, più avanzate e raffinate, e le versioni più antiche, più primitive e più semplici avessero esattamente altrettanto successo contro le loro antiarmi contemporanee. C'è stato sì un progresso nella progettazione ma non nell'efficacia, proprio

perché ai progressi nelle armi offensive hanno fatto riscontro progressi altrettanto grandi in quelle difensive. In effetti, c'è stato un progresso così grande nel livello di raffinatezza e complessità del progetto proprio perché c'è stato un progresso press'a poco uguale da entrambe le parti. Se una parte, per esempio il dispositivo per ostacolare l'efficacia del missile disturbando le comunicazioni radio, avesse fatto segnare progressi molto maggiori, l'altra parte, in questo caso il missile, non sarebbe stato semplicemente più usato e prodotto: esso si sarebbe «estinto». Lungi dall'essere paradossale come l'esempio originale di Alice, l'effetto della Regina Rossa, nel suo contesto della corsa agli armamenti, risulta essere di importanza fondamentale per l'idea stessa di avanzamento progressivo.

Ho detto che le corse agli armamenti asimmetriche hanno maggiori probabilità di quelle simmetriche di condurre a miglioramenti progressivi interessanti, e ora possiamo vedere perché sia così, servendoci, per illustrare questo punto, degli armamenti umani. Se una nazione ha una bomba da 2 megaton, la nazione nemica svilupperà una bomba da 5 megaton. Questo fatto indurrà la prima nazione a sviluppare una bomba da 10 megaton, cosa che stimolerà a sua volta la seconda a produrne una da 20 megaton, e via dicendo. Questa è una vera corsa agli armamenti progressiva: ogni passo avanti da una parte provoca in risposta un ulteriore avanzamento dall'altra, col risultato di un costante aumento al passare del tempo di qualche attributo, in questo caso della potenza esplosiva delle bombe. In una tale corsa agli armamenti simmetrica, diversamente da quanto si verifica in una corsa agli armamenti asimmetrica come quella fra il missile e il sistema di difesa antimissile, non c'è però una corrispondenza dettagliata, biunivoca, fra i progetti, un «collegamento» o «interconnessione» fra particolari dei progetti contrapposti. L'antiarma del missile è progettata specificamente per mettere fuori uso determinati particolari funzionali del missile; il progettista dell'antiarma deve tener conto di dettagli anche minimi del progetto del missile. Poi, nel progettare una contromossa all'antiarma, il progettista della generazione successiva di missili fa uso della sua conoscenza del progetto dettagliato dell'antiarma contro il missile della precedente generazione. Quanto ho detto fin qui non si applica alle bombe di potenza sempre crescente. È vero, senza dubbio, che i progettisti di uno dei due paesi antagonisti possono copiare buone idee, e imitare buoni particolari dei progetti dell'altra parte, ma questo fatto rimane comunque incidentale. Non è una parte necessaria del progetto di una bomba russa che essa debba avere corrispondenze particolareggiate e puntuali con dettagli specifici di una bomba americana. Nel caso di una corsa agli armamenti specifica, fra una linea genealogica di armi offensive e gli antidoti specifici a tali armi, è invece proprio la corrispondenza puntuale nei particolari a condurre, nel corso delle successive «generazioni», a una sempre maggiore raffinatezza e complessità. Anche nel mondo vivente noi ci attendiamo di trovare un progetto complesso e raffinato ogni volta che ci occupiamo dei prodotti finali di una lunga corsa agli armamenti asimmetrica, in cui i progressi compiuti da una parte devono sempre trovare una risposta, punto per punto, in antidoti altrettanto efficienti dall'altra (mentre nelle corse agli armamenti simmetriche si ha una competizione diretta nello stesso tipo di prestazioni). Questo punto risulta chiaramente vero nel caso delle corse agli armamenti fra i predatori e le loro prede, e, forse ancor più, nel caso delle corse agli armamenti fra i parassiti e i loro ospiti. I sistemi di armi elettroniche e acustiche dei pipistrelli, di cui ci siamo occupati nel capitolo II, hanno tutta la raffinata complessità che possiamo attenderci dai prodotti finali di una lunga corsa agli armamenti. Non ci sorprende di trovare questa stessa corsa agli armamenti anche dall'altra parte. Gli insetti su cui i pipistrelli esercitano la loro attività di predazione posseggono una batteria comparabile di complessi dispositivi «elettronici» e acustici. Alcune falene emettono addirittura (ultra)suoni simili a quelli dei pipistrelli che sembrano mettere fuori uso i dispositivi del loro nemico. Quasi tutti gli animali corrono il pericolo o di essere mangiati da altri animali o di non riuscire a mangiare altri animali, e un numero enorme di particolari precisi nell'equipaggiamento degli animali hanno un senso solo quando ricordiamo che essi sono il prodotto finale di lunghe e aspre corse agli armamenti. H.B. Cott, autore del libro classico *Adaptive Coloration in Animals*, chiarì bene questo punto nel 1940, in quello che potrebbe essere il primo uso in un'opera a stampa dell'analogia della corsa agli armamenti in biologia: Prima di affermare che l'aspetto ingannevole di una cavalletta o di una farfalla ha una ricchezza di

particolari superflua, dobbiamo accertare quali siano i poteri di percezione e di discriminazione dei nemici naturali degli insetti. Non compiere questo esame preliminare sarebbe come affermare che la corazza di un incrociatore da battaglia è troppo pesante, o la gittata dei suoi cannoni troppo grande, senza avere prima accertato quali siano la natura e l'efficacia delle armi del nemico. Il fatto è che nella lotta primordiale della foresta, come nei perfezionamenti della guerra civilizzata, noi osserviamo in atto una grande corsa agli armamenti evolutiva, i cui risultati, per la parte della difesa, si manifestano in fattori come la velocità, la vigilanza, la corazza, la spinosità, l'abitudine di scavare gallerie, le abitudini notturne, le secrezioni velenose, il sapore disgustoso [e il mimetismo e altri tipi di colorazione protettiva]; e, per l'offesa, in attributi contrari come la velocità, la sorpresa, l'agguato, l'allettamento, l'acutezza visiva, artigli, zanne, aculei, denti del veleno [e esche]. Come una maggiore velocità nell'inseguito si è sviluppata in relazione a un'accresciuta velocità nell'inseguitore; o una corazza difensiva in relazione allo sviluppo di armi offensive nella controparte; così la perfezione di espedienti destinati a favorire l'occultamento si è evoluta in risposta ad accresciuti poteri di percezione.

Le corse agli armamenti nella tecnologia umana sono più facili da studiare dei loro equivalenti biologici grazie alla loro rapidità molto maggiore. Noi possiamo osservarle nel loro reale svolgimento da un anno all'altro. Nel caso di una corsa agli armamenti biologica noi abbiamo invece l'opportunità di osservare di solito solo i prodotti finali. Solo in casi molto rari accade che un animale o un vegetale morto si fossilizzi, e allora diventa a volte possibile osservare un po' più direttamente fasi progressive in una corsa agli armamenti animale. Uno fra gli esempi più interessanti concerne la corsa alle armi «elettroniche», quale si osserva nella capacità cranica di animali fossili.

Il cervello non si fossilizza, ma il cranio sì, e la cavità in cui il cervello è stato alloggiato - la scatola cranica -, se interpretata con cura, può fornire una buona indicazione delle dimensioni del cervello. Ho detto «se interpretata con cura», e questa precisazione è importante. Fra i molti problemi c'è il fatto che gli animali di grande mole tendono ad avere un cervello di grandi dimensioni in conseguenza della loro stessa grandezza, senza che ciò significhi che siano necessariamente «più intelligenti» in un qualsiasi senso interessante. Gli elefanti hanno un cervello più grosso di quello degli esseri umani ma, probabilmente non senza fondamento, noi pensiamo di essere più intelligenti degli elefanti e di avere «in realtà» un cervello più grosso, se si tiene conto della nostra mole corporea molto minore. Senza dubbio il nostro cervello occupa una proporzione del nostro corpo molto maggiore di quella che occupa il cervello dell'elefante rispetto al suo corpo, come dimostra anche la forma del nostro cranio. Questa non è solo vanità di specie. È presumibile che una frazione consistente di qualsiasi cervello venga usata per svolgere operazioni di routine nel funzionamento del corpo, e un corpo di mole maggiore richiede automaticamente un cervello più grande. Noi dobbiamo trovare un modo per «detrarre» dai nostri calcoli quella frazione di cervello che può essere attribuita semplicemente alla mole corporea, in modo da poter eseguire comparazioni di ciò che rimane fra i vari animali per valutarne la vera «cerebralità». Questo è un altro modo per dire che abbiamo bisogno di un buon modo per definire esattamente che cosa intendiamo per vera intelligenza. I diversi studiosi hanno la massima libertà nell'escogitare metodi per eseguire questo calcolo, ma probabilmente l'indice più autorevole che è stato trovato è il «quoziente di encefalizzazione» o qe usato da Harry Jerison, una fra le principali autorità in America sulla storia del cervello.

Il qe viene calcolato in realtà in modo un po' complesso, prendendo logaritmi del peso del cervello e del peso del corpo e standardizzando in relazione ai valori medi per un gruppo molto esteso come quello dei mammiferi nel loro complesso. Esattamente come il «quoziente di intelligenza» o Qi usato dagli psicologi umani (che spesso d'altra parte ne abusano) è standardizzato in relazione alla media dell'intera popolazione, così il qe è standardizzato in relazione, per esempio, all'intera classe dei mammiferi. E proprio come un qi di 100 significa, per definizione, un qi identico alla media per un'intera popolazione, così un qe di 1 significa, per definizione, un qe identico alla media, per esempio, dei mammiferi di tale mole corporea. I particolari della tecnica matematica non ci interessano. In parole, il qe di una specie data, come un rinoceronte o un gatto, è una misura di

quanto il cervello di quell'animale sia più grande (o più piccolo) di quanto dovremmo attenderci che fosse data la mole corporea dell'animale. In che modo tale attesa venga calcolata è senza dubbio una questione soggetta a discussioni e a critiche. Il fatto che gli esseri umani abbiano un qe di 7 e gli ippopotami un qe di 0,3 potrebbe non significare letteralmente che gli esseri umani siano 23 volte più intelligenti degli ippopotami. Ma il qe quale viene misurato ci dice probabilmente qualcosa su quanto «potere di calcolo» un animale abbia nella sua testa, oltre al potere di calcolo minimo irriducibile che si richiede per il funzionamento del suo corpo, grande o piccolo che sia.

I qe misurati nei mammiferi moderni sono molto vari. I ratti hanno un qe di circa 0,8, di poco inferiore alla media per tutti i mammiferi. Gli scoiattoli lo hanno un po' più alto, di circa 1,5.

Forse il mondo tridimensionale degli alberi richiede un potere di calcolo extra per controllare i salti di precisione, e ancor più per riflettere su percorsi efficaci attraverso un dedalo di rami che più avanti potrebbero essere o non essere connessi. Le scimmie cinomorfe sono molto al di sopra della media, e ancora più su sono le scimmie antropomorfe (e specialmente noi stessi). Fra le scimmie cinomorfe risulta che alcune specie hanno qe più alti di altre e che, fatto molto interessante, esiste qualche connessione anche con i cibi di cui si nutrono (e quindi col modo in cui si procurano il cibo): le scimmie che si cibano di insetti e di frutti hanno un cervello più grosso, relativamente alla loro mole corporea, rispetto alle scimmie che mangiano foglie. Ha senso sostenere che un animale ha bisogno di una minore potenza di calcolo per trovare foglie, che abbondano tutto attorno, che non per trovare frutti, che a volte devono essere cercati attivamente, o per catturare insetti, che si danno da fare con impegno per evitare la cattura. Oggi si ha purtroppo l'impressione che la vera storia sia molto complessa, e che possano essere più importanti altre variabili, come l'attività metabolica.

Nei mammiferi nel loro complesso, i carnivori hanno di solito un qe leggermente superiore a quello degli erbivori di cui si cibano. Il lettore avrà probabilmente qualche idea sulla possibile causa di questo stato di cose, ma è difficile sottoporre a verifica idee del genere. Ma, quale che ne sia la ragione, pare comunque che si tratti di un fatto accertato.

Tanto basti per quanto concerne gli animali moderni. Quel che Jerison ha fatto è stato di ricostruire i probabili qe di animali estinti che oggi esistono solo sotto forma di fossili. Egli ha stimato il volume dell'encefalo per mezzo di calchi in gesso della cavità interna del cranio. In questo lavoro entra una quantità considerevole di congetture e di stime, ma i margini di errore non sono così grandi da vanificare l'intera impresa. La precisione del metodo dei calchi in gesso, dopo tutto, può essere verificata usando animali moderni. Dobbiamo fingere, a tale scopo, che il cranio essiccato di un animale moderno sia tutto ciò che ce ne rimane, usare un calco in gesso per stimare il volume del suo encefalo sulla base del solo cranio, e poi confrontare il risultato così ottenuto col cervello vero per vedere quanto fosse esatta la nostra stima. Queste verifiche compiute su crani moderni incoraggiano la fiducia nelle stime di Jerison del volume encefalico di animali morti da molto tempo. La conclusione di Jerison è, innanzitutto, che i cervelli hanno la tendenza a diventare più grandi al passare dei milioni di anni. In ogni epoca data gli erbivori tendevano ad avere un cervello più piccolo rispetto a quello dei carnivori che davano loro la caccia. Gli erbivori posteriori presentano però di norma un cervello più grosso rispetto agli erbivori anteriori, e i carnivori posteriori rispetto ai carnivori anteriori. Ci sembra di vedere documentata, nei fossili, una corsa agli armamenti, o piuttosto una serie di corse agli armamenti, che ricominciavano di continuo, fra carnivori ed erbivori. Questo è un parallelo particolarmente interessante con le corse agli armamenti umane, dal momento che il cervello è il «computer di bordo» usato tanto dai carnivori quanto dagli erbivori, e l'elettronica è probabilmente l'elemento che sta progredendo più rapidamente nella tecnologia degli armamenti attuale.

Come hanno fine le corse agli armamenti? A volte possono terminare con l'estinzione di una delle due parti, nel qual caso l'altra parte cessa probabilmente di evolversi in quella particolare direzione progressiva, e potrebbe in effetti addirittura «regredire», per ragioni economiche che esamineremo ben presto. In altri casi pressioni economiche potrebbero imporre un arresto stabile a una corsa agli armamenti, anche nel caso che una delle due parti fosse, in un certo senso, permanentemente in testa.

Consideriamo, per esempio, la velocità nella corsa. Dev'esserci un limite ultimo alla velocità con cui un ghepardo o una gazzella possono correre, un limite imposto dalle leggi della fisica. Né i ghepardi né le gazzelle hanno però raggiunto tale limite. Gli uni e le altre hanno presentato la tendenza ad approssimarsi a un limite inferiore, che deve avere secondo me un carattere economico. La tecnologia delle alte velocità è dispendiosa. Essa richiede ossa delle gambe lunghe, muscoli possenti, polmoni di grande capacità. Tutti questi requisiti possono essere posseduti da un animale che abbia realmente bisogno di correre velocemente, ma devono essere pagati. Il loro prezzo, inoltre, è sempre più alto. Il prezzo è misurato da quello che gli economisti chiamano «costo alternativo». Il costo alternativo di qualcosa si misura come la somma di tutte le altre cose cui si deve rinunciare per avere quella cosa. Se mandiamo un figlio in una scuola privata, il costo alternativo che tale decisione significa per noi consiste in tutte le altre cose che, in conseguenza di tale decisione, non possiamo più comprare: la rinuncia a comprare una nuova automobile, le vacanze che non potremo più permetterci (per chi è abbastanza ricco da potersi permettere facilmente tutte queste cose, il costo alternativo di mandare un figlio in una scuola privata può essere quasi niente). Il prezzo, per un ghepardo, di sviluppare muscoli delle zampe sempre più grandi consiste in tutte le altre cose che esso avrebbe potuto fare con i materiali e l'energia usati per costruire i muscoli delle zampe, per esempio (nel caso della femmina) produrre più latte per i piccoli.

Non c'è nulla, ovviamente, che suggerisca che i ghepardi eseguano calcoli dei costi nella loro testa! Tutti questi calcoli vengono eseguiti automaticamente dalla comune selezione naturale. Un ghepardo rivale che non abbia muscoli delle zampe altrettanto sviluppati può non correre altrettanto velocemente ma dispone di risorse in più che possono essere usate per produrre (se è una femmina) una quantità extra di latte e perciò per allevare forse un altro piccolo. I ghepardi che, grazie ai loro geni, presentano il compromesso ottimale fra la velocità nella corsa, la produzione di latte e tutte le altre voci del loro bilancio saranno in grado di allevare un maggior numero di piccoli. Non è ovvio a prima vista quale sia il compromesso ottimale fra, diciamo, la velocità nella corsa e la produzione di latte. Esso sarà certamente diverso per le varie specie e potrebbe presentare oscillazioni all'interno di ciascuna specie. Quel che è certo è che compromessi di questo genere saranno inevitabili. Quando tanto i ghepardi quanto le gazzelle avranno raggiunto la velocità massima che possono «permettersi» nelle loro economie interne, la corsa agli armamenti fra di loro finirà. I loro rispettivi punti di arresto economici potrebbero non lasciarli in una posizione di perfetto equilibrio. Gli animali prede potrebbero finire con lo spendere in armi difensive una quantità del loro bilancio relativamente maggiore di quella spesa dai predatori in armi offensive. Una ragione di questo stato di cose è compendiata nella morale esopica: il coniglio corre più veloce della volpe perché corre per salvarsi la vita mentre la volpe corre solo per procurarsi un pasto. In termini economici ciò significa che le singole volpi che stornano risorse su altri progetti potrebbero cavarsela meglio delle volpi che spendono praticamente tutte le loro risorse nella tecnologia della caccia. Nella popolazione dei conigli, d'altra parte, il bilancio del vantaggio economico è spostato verso quegli individui che spendono di più in equipaggiamenti per acquistare una maggiore velocità nella corsa. Il succo di questi bilanci economicamente orientati all'interno di specie è che le corse agli armamenti fra specie tendono a una conclusione stabile da entrambe le parti, con una parte che conserva un vantaggio.

È improbabile che ci sia dato di assistere a corse agli armamenti in svolgimento, essendo improbabile che esse siano in corso in un qualsiasi «momento» particolare del tempo geologico, come potrebbe essere il nostro tempo. Ma gli animali che osserviamo nel nostro tempo possono essere interpretati come i prodotti finali di una corsa agli armamenti condotta in passato.

Per compendiare il senso di questo capitolo: i geni vengono selezionati non in vista delle loro qualità intrinseche, ma in virtù delle loro interazioni col loro ambiente. Una componente particolarmente importante dell'ambiente di un gene è costituita da altri geni. La ragione generale dell'importanza di questa componente è che anche gli altri geni cambiano nella storia evolutiva al succedersi delle generazioni. Questo fatto ha due tipi di conseguenze.

Innanzitutto ne sono risultati avvantaggiati i geni che hanno la proprietà di «cooperare» con quegli

altri geni che accade loro spesso di incontrare in circostanze favorevoli alla cooperazione. Ciò vale specialmente, anche se non esclusivamente, per i geni all'interno di una stessa specie, poiché i geni di una stessa specie condividono spesso cellule fra loro. Questo fatto ha condotto all'evoluzione di grandi gruppi di geni inclini a cooperare fra loro, e infine all'evoluzione dei corpi stessi, come prodotti della cooperazione fra geni. Un singolo corpo è un grande veicolo o «macchina per la sopravvivenza» costruito da una cooperativa di geni, allo scopo di conservare copie di ciascun membro di tale cooperativa. Quei geni cooperano perché hanno tutti qualcosa da guadagnare dallo stesso risultato - la sopravvivenza e riproduzione del corpo comune - e perché costituiscono una parte importante dell'ambiente in cui la selezione naturale opera su ciascuno e su tutti.

In secondo luogo, non sempre le circostanze favoriscono la cooperazione. Nel loro cammino lungo il tempo geologico, i geni si incontrano fra loro anche in circostanze favorevoli all'antagonismo. Ciò vale specialmente, anche se non esclusivamente, per geni di specie diverse. È ovvio che i geni di specie diverse non si mescolano fra loro, perché gli organismi appartenenti a specie diverse non possono accoppiarsi. Quando geni selezionati in una specie forniscono l'ambiente in cui vengono selezionati geni in un'altra specie, ne risulta spesso una corsa agli armamenti evolutiva. Ogni nuovo miglioramento genetico selezionato da una parte - per esempio dai predatori - modifica l'ambiente per la selezione dei geni nell'altra parte, fra le prede. È soprattutto alle corse agli armamenti di questo genere che si deve la qualità apparentemente progressiva dell'evoluzione, il conseguimento di una velocità sempre maggiore nella corsa, l'abilità nel volo, l'acutezza visiva, la finezza dell'udito e via dicendo. Queste corse agli armamenti non continuano per sempre ma si stabilizzano quando, per esempio, ulteriori miglioramenti diventano economicamente troppo costosi per gli animali che dovrebbero adottarli.

Questo è stato un capitolo difficile ma indispensabile. Senza di esso avrei lasciato nel lettore la sensazione che la selezione naturale sia solo un processo distruttivo, o nella migliore delle ipotesi un processo di sfoltimento. Abbiamo visto due modi in cui la selezione naturale può essere una forza costruttiva. Un modo concerne i rapporti di cooperazione fra geni all'interno di specie. Il nostro assunto fondamentale dev'essere che i geni sono entità «egoistiche», che lavorano al fine della loro propagazione nel pool genico della specie. Poiché però l'ambiente di un gene consiste, in misura tanto importante, in altri geni soggetti a loro volta a essere selezionati nello stesso pool genico, saranno favoriti quelli capaci di cooperare con altri nello stesso pool genico.

Ecco perché si sono evoluti grandi corpi di cellule, che lavorano in modo coordinato verso gli stessi fini cooperativi. Ecco perché esistono corpi, piuttosto che replicatori separati ancora impegnati a lottare in singolar tenzone nel brodo primordiale.

I corpi evolvono un'intenzionalità integrata e coerente perché i geni vengono selezionati nell'ambiente fornito da altri geni all'interno della stessa specie. Ma poiché i geni vengono selezionati anche nell'ambiente fornito da altri geni di specie diverse, si sviluppano corse agli armamenti. E le corse agli armamenti costituiscono l'altra grande forza che spinge l'evoluzione in direzioni che noi riconosciamo come «progressive», verso la complessità del «disegno». Le corse agli armamenti hanno un carattere intrinsecamente instabile che le spinge a un'escalation «sfrenata». Esse si avventano di gran carriera nel futuro in un modo che, sotto un certo aspetto, è inutile e vano, mentre sotto un altro aspetto risulta progressivo e infinitamente affascinante per noi, gli osservatori. Nel prossimo capitolo affronteremo un caso particolare piuttosto speciale di evoluzione esplosiva sfrenata, il caso designato da Darwin con l'espressione «selezione sessuale».

VIII

Esplosioni e spirali

La mente umana è attratta da tempo immemorabile verso la costruzione di analogie. Noi siamo soggetti alla tentazione irresistibile di vedere un significato in somiglianze anche lievi fra processi molto diversi. Io spesi gran parte di una giornata a Panama a osservare due colonne brulicanti di formiche tagliafoglie in lotta fra loro, e la mia mente comparò irresistibilmente il campo di battaglia

cosparso di membra staccate a immagini che avevo visto della battaglia delle Fiandre. Riuscivo quasi a udire i cannoni e a sentire l'odore del fumo. Poco tempo dopo la pubblicazione del mio primo libro, *Il gene egoista*, fui avvicinato indipendentemente da due ecclesiastici, i quali erano pervenuti entrambi alla stessa analogia fra idee contenute nel libro e la dottrina del peccato originale. Darwin applicò l'idea di evoluzione a un campo specifico, quello di organismi viventi che modificano la forma del loro corpo in capo a innumerevoli generazioni. I suoi successori sono stati tentati di vedere l'evoluzione in ogni cosa; nel mutare della forma dell'universo, negli «stadi» di sviluppo di civiltà umane, in mode nella lunghezza delle gonne. A volte analogie del genere possono essere immensamente feconde, ma è facile spingerle troppo lontano ed entusiasmarci in misura eccessiva per analogie così tenui da risultare inutili o addirittura dannose. Io mi sono abituato a ricevere la mia parte di lettere stravaganti e ho imparato che uno dei caratteri di una folle stravaganza è un uso troppo entusiasta dell'analogia.

D'altra parte alcuni fra i massimi progressi nella scienza si sono verificati proprio grazie al fatto che qualche persona intelligente ha scorto un'analogia fra un campo già ben compreso e un argomento ancora misterioso. Tutto sta nel riuscire a raggiungere il giusto punto di equilibrio fra un uso troppo indiscriminato dell'analogia da un lato e una sterile cecità verso analogie feconde dall'altro. Lo scienziato di successo e l'eccentrico delirante sono separati dalla qualità della loro ispirazione. Io sospetto però che questa differenza consista, in pratica, non tanto nella capacità di rilevare analogie quanto piuttosto in quella di rifiutare analogie senza senso e di perseguire quelle utili. A prescindere dal fatto che noi qui ci troviamo dinanzi a un'altra analogia ancora - quella fra progresso scientifico e selezione darwiniana -, la quale potrebbe essere banale o feconda (e che certamente non è originale), vorrei venire al punto che ci interessa in relazione all'argomento di questo capitolo. Il punto è che sto per avventurarmi in due analogie interconnesse che mi sembrano ricche di ispirazione ma che, se non stiamo attenti, potrebbero condurci troppo lontano. La prima è un'analogia fra vari processi che sono accomunati dalla loro somiglianza a esplosioni. La seconda è un'analogia fra la vera evoluzione darwiniana e quella che è stata chiamata evoluzione culturale. Io sono convinto che queste analogie possano essere feconde, altrimenti non avrei dedicato loro questo capitolo. Il lettore è comunque avvertito.

La proprietà delle esplosioni che giustifica l'uso di questa analogia è quella nota agli ingegneri come «retroazione positiva» (o feed-back positivo). La retroazione positiva può essere intesa nel modo migliore in relazione al suo opposto, la retroazione negativa. Quest'ultima è la base della maggior parte delle forme di controllo e regolazione automatici, e uno dei suoi esempi più chiari e meglio noti è il regolatore a sfere o regolatore a pendolo a braccio oscillante di Watt. Un motore, per essere utile, dovrebbe fornire una potenza rotativa a un numero di giri costante, il numero di giri giusto per i lavori cui viene adibito, in mulini, nella tessitura, nel lavoro di pompe e via dicendo. Prima di Watt il problema era che la velocità di rotazione dipendeva dalla pressione del vapore. Quando si caricava il forno il motore si accelerava, creando una situazione non certo soddisfacente per un opificio o per un telaio che richiedano per le proprie macchine una spinta uniforme. Il regolatore di Watt era una valvola automatica che regolava il flusso di vapore che perveniva al pistone.

L'idea intelligente che permise a Watt di escogitare il suo regolatore fu quella di connettere la valvola al moto di rotazione prodotto dal motore, in modo tale che, quanto più elevata era la velocità di rotazione, tanto più la valvola chiudeva l'afflusso di vapore. Inversamente quando il motore rallentava le valvole si aprivano lasciando passare più vapore. Ne conseguiva che un motore che girava troppo lentamente veniva subito accelerato mentre un motore che girava troppo velocemente veniva subito rallentato. Il mezzo preciso attraverso il quale il regolatore misurava la velocità era semplice ma efficace, e il principio è in uso ancor oggi. Due sfere fissate a due bracci articolati ruotano con la stessa velocità dell'albero motore. Quando la rotazione è rapida, le sfere, che ruotano in un piano perpendicolare a quello dell'albero motore, tendono in conseguenza della forza centrifuga ad allontanarsi dall'albero, e in virtù dell'articolazione dei loro bracci salgono lungo l'albero. Quando il motore ruota lentamente accade l'inverso, e le sfere si abbassano. I bracci articolati sono connessi direttamente alla valvola del vapore. Grazie a un'opportuna regolazione fine, il regolatore di Watt riesce ad assicurare al motore una rotazione pressoché costante,

nonostante fluttuazioni considerevoli nel forno.

Il principio che è alla base del regolatore di Watt è la retroazione negativa. L'output (uscita) del motore (in questo caso il moto di rotazione) viene reimmesso (feed-back) nel motore (attraverso la valvola del vapore). La retroazione è negativa perché un output elevato (una rotazione veloce delle sfere) ha un effetto negativo sull'input (ingresso, ossia sulla quantità di vapore fornita).

Inversamente, un basso output (lenta rotazione delle sfere) produce un aumento dell'input (pressione del vapore), rovesciando di nuovo il segno. Ma io ho introdotto l'idea di retroazione negativa solo per metterla a contrasto con la retroazione positiva. Prendiamo una macchina a vapore con un regolatore di Watt, e apportiamo in essa un mutamento cruciale. Rovesciamo il segno del rapporto fra il dispositivo delle sfere centrifughe e la valvola del vapore. Ora, quando le sfere ruotano velocemente, la valvola, anziché chiudersi come nel regolatore di Watt, si apre.

Inversamente, quando le sfere ruotano lentamente, la valvola, anziché consentire un flusso di vapore accresciuto, lo riduce. In una macchina a vapore normale, con un regolatore di Watt, un motore che cominciasse a rallentare correggerebbe ben presto questa tendenza e accelererebbe di nuovo la sua rotazione fino a raggiungere la velocità desiderata. Ma il motore da noi truccato fa esattamente l'opposto. Se comincia a rallentare, presenta la tendenza a rallentare ancora di più e ben presto sarà ridotto a fermarsi. Se invece si trova ad accelerare, per quanto lievemente, questa tendenza, anziché essere corretta come in una macchina di Watt, si accresce. La lieve accelerazione viene rinforzata dal regolatore rovesciato, e la rotazione si accelera. L'accelerazione dà inizio a una retroazione positiva, e il motore accelera ancor di più. Quest'accelerazione continua finché o il motore cede sotto lo sforzo e il volano schizza via a tutta velocità abbattendo il muro della fabbrica oppure, esaurita la pressione del vapore, la macchina non riesce più ad andare oltre la velocità massima impostata dall'energia del vapore disponibile.

Mentre il regolatore di Watt originario si serve della retroazione negativa, l'ipotetico regolatore da noi truccato esemplifica il processo opposto della retroazione positiva. I processi di retroazione positiva hanno una qualità instabile, quella di procedere in modo sempre più rapido. Lievi perturbazioni iniziali vengono accresciute e continuano ad accelerarsi in una spirale sempre crescente, la quale culmina o in una catastrofe o in una discesa a un qualche livello inferiore in conseguenza di altri processi. Gli ingegneri hanno trovato utile unire una grande varietà di processi sotto la singola denominazione di retroazione negativa, e un'altra grande varietà sotto quella di retroazione positiva. Le analogie sono feconde non solo in un qualche vago senso qualitativo, ma per il fatto che tutti i processi condividono le stesse formulazioni matematiche. I biologi che studiano fenomeni come il controllo della temperatura nel corpo o i meccanismi di sazietà che impediscono di mangiare in misura eccessiva, hanno trovato utile prendere a prestito dagli ingegneri la matematica della retroazione negativa. I sistemi di retroazione positiva sono usati meno di quelli di retroazione negativa, tanto dagli ingegneri quanto dagli organismi viventi, ma nondimeno è proprio della retroazione positiva che ci occuperemo in questo capitolo.

La ragione per cui gli ingegneri e gli organismi viventi usano più spesso i sistemi di retroazione negativa che quelli di retroazione positiva consiste, ovviamente, nell'utilità di una regolazione controllata in prossimità di un optimum. I processi instabili in cui si registrano accelerazioni incontrollate, lungi dall'essere utili, possono essere decisamente dannosi. In chimica il processo di retroazione positiva tipico è un'esplosione, e noi usiamo comunemente questa parola per descrivere un qualsiasi processo sfrenato. Per esempio, possiamo dire che una persona ha un carattere esplosivo. Uno dei miei maestri era un uomo colto, cortese e di solito gentile, ma a volte aveva esplosioni incontenibili di collera, cosa di cui era del resto consapevole. Quando veniva fatto segno a qualche grave provocazione in classe, dapprima non diceva niente, ma il suo viso mostrava che dentro di lui stava accadendo qualcosa di insolito. Poi, cominciando con un tono tranquillo e ragionevole diceva: «Oh, cari. Non riesco a trattenermi. Sto perdendo la calma. Rifugiatevi sotto i vostri banchi. Vi avverto. Sta arrivando». Mentre stava facendo questo discorso alzava progressivamente la voce e, in un crescendo irresistibile, afferrava tutto ciò che gli capitava fra le mani, libri, cancellini per la lavagna con montatura in legno, fermacarte, calamai, e li scagliava in rapida successione, con estrema forza e violenza ma con pessima mira, press'a poco nella direzione

del ragazzo che aveva suscitato la sua collera. Poi, gradualmente, la sua ira sbolliva, e il giorno seguente si scusava con la massima cortesia con lo stesso ragazzo. Si rendeva ben conto di aver perso il controllo, e di essere diventato vittima di un ciclo di retroazione positiva.

Ma la retroazione positiva non conduce solo ad accrescimenti sfrenati, bensì può condurre anche a diminuzioni incontrollabili.

Recentemente sono stato presente, in un consiglio di facoltà dell'Università di Oxford, a una discussione sull'opportunità o meno di offrire una laurea ad honorem a un tale. Cosa insolita, la decisione non fu presa all'unanimità. Dopo il voto, durante i quindici minuti che si richiesero per lo scrutinio delle schede, ci fu un frastuono generale di conversazione fra coloro che erano in attesa di conoscere il risultato. A un certo punto la conversazione stranamente si spense e ci fu un silenzio totale. La ragione di questo fatto era stata un tipo particolare di retroazione positiva, che aveva funzionato nel modo seguente. In ogni brusio generale di conversazione ci sono inevitabilmente fluttuazioni nel livello di rumore, che noi normalmente non avvertiamo. Una di queste fluttuazioni casuali, in direzione della quiete, si trovò a essere leggermente più pronunciata del solito, col risultato che alcune persone la avvertirono. Poiché tutti erano in ansiosa attesa dell'annuncio del risultato della votazione, coloro che percepirono la diminuzione casuale nel livello del rumore alzarono lo sguardo interrompendo la loro conversazione. Si era così iniziata una retroazione positiva, la quale poi continuò rapidamente sino a raggiungere il silenzio totale in sala. Quando ci si rese conto che era stato un falso allarme, ci fu una risata, seguita da un lento aumento del rumore sino al livello precedente.

Le retroazioni positive più notevoli e spettacolari sono quelle che danno luogo non a una diminuzione bensì a un aumento incontrollabile in qualcosa: un'esplosione nucleare, un maestro di scuola che perde le staffe, una rissa in un bar, uno scambio sempre più violento di invettive alle Nazioni Unite (il lettore può tener conto dell'avvertimento con cui ho iniziato questo capitolo). L'importanza della retroazione positiva nei rapporti internazionali è riconosciuta implicitamente nella parola gergale *escalation*: quando diciamo che il Medio Oriente è una *^polveriera* e quando identifichiamo dei «punti caldi». Una delle espressioni meglio note dell'idea di retroazione positiva si trova nel Vangelo di Matteo: «A chiunque ha sarà dato, e sarà nell'abbondanza; ma a chiunque non ha, sarà tolto anche quello che ha». In questo capitolo ci occupiamo della retroazione positiva nell'evoluzione. Ci sono dei caratteri di organismi viventi che hanno tutta l'aria di essere i prodotti finali di qualcosa di simile a un processo evolutivo sfrenato, esplosivo, alimentato da una retroazione positiva. Le corse agli armamenti esaminate nel capitolo precedente sono un esempio moderato di retroazione positiva, ma gli esempi veramente spettacolari si trovano negli organi di richiamo sessuale.

Cercate di convincervi, come i miei insegnanti cercarono di convincermi quando ero studente universitario, che la coda del pavone è semplicemente un organo funzionale, come un dente o un polmone, creato dalla selezione naturale al solo scopo utilitario di etichettare l'uccello, senza ambiguità, come membro di questa specie e non di quella. Essi non riuscirono mai a convincermi e io dubito che anche voi riusciate a convincervi. Per me la coda del pavone ha il contrassegno inconfondibile della retroazione positiva. Essa è chiaramente il prodotto di una qualche sorta di esplosione instabile, incontrollata, che ebbe luogo alla scala dell'evoluzione. Fu questa l'opinione di Darwin nella sua teoria della selezione sessuale e questa fu anche, esplicitamente, l'opinione del più grande dei suoi successori, R.A. Fisher. Dopo un breve ragionamento, Fisher concluse (nel libro *The Genetical Theory of Natural Selection*): Lo sviluppo del piumaggio nel maschio, e la preferenza sessuale per tali sviluppi nella femmina, devono quindi avanzare assieme e, finché questo processo non sia controllato da una severa selezione contraria, avanzeranno con velocità sempre crescente. In un'assenza totale di siffatti controlli, è facile vedere che la velocità di sviluppo sarà proporzionale allo sviluppo già raggiunto, che aumenterà perciò col tempo in modo esponenziale, ossia in progressione geometrica.

È tipico di Fisher che quello che egli trovò «facile vedere» non fu pienamente compreso da altri se non mezzo secolo dopo. Egli non ebbe timore di affermare nel modo più esplicito che l'evoluzione di un piumaggio sessualmente attraente potrebbe avanzare con rapidità sempre maggiore, in modo

esponenziale, esplosivo. Gli altri esponenti del mondo biologico impiegarono cinquant'anni per raggiungere la sua posizione e ricostruire finalmente appieno il tipo di ragionamento matematico che Fisher doveva avere usato, o espressamente su carta o nella sua testa, per dimostrare a se stesso la sua tesi. Io tenterò di spiegare, con semplici parole, queste idee matematiche che, nella loro forma moderna, sono state grandemente sviluppate dal giovane biologo matematico americano Russell Lande. Benché io non sia così pessimista come lo stesso Fisher, che nella prefazione del suo libro del 1930 scrisse: «Nessuno sforzo da parte mia potrebbe servire a rendere il libro di facile lettura», nondimeno, per usare le parole di un gentile recensore del mio primo libro, «si consiglia al lettore di calzare le scarpette da corsa mentali». Io stesso ho dovuto compiere un duro sforzo per capire queste difficili idee. Qui, nonostante le sue proteste, devo riconoscere il mio debito nei confronti del mio collega ed ex allievo Alan Grafen, i cui calzari alati mentali sono notoriamente in una categoria a sé, ma che ha l'abilità ancora più rara di toglierli e trovare il modo giusto per spiegare le cose agli altri.

Senza il suo insegnamento io non sarei stato semplicemente in grado di scrivere la parte centrale di questo capitolo, ed è questa la ragione per cui io mi rifiuto di relegare questo mio ringraziamento nella prefazione.

Prima di venire a questo difficile argomento, devo fare un salto indietro e dire qualcosa sull'origine dell'idea della selezione sessuale. Essa cominciò, come molte altre cose in questo campo, con Charles Darwin. Pur insistendo principalmente sulla sopravvivenza e sulla lotta per l'esistenza, Darwin riconobbe che l'esistenza e la sopravvivenza erano solo mezzi in vista di un fine. Un fagiano può vivere per molti anni, ma se non si riproduce non trasmetterà i suoi caratteri alle generazioni seguenti. La selezione favorisce le qualità che conferiscono a un animale il successo nella riproduzione, e la sopravvivenza è solo una parte della battaglia per la riproduzione. In altre parti della battaglia il successo va agli individui che sono più attraenti per il sesso opposto. Darwin vide che, se un fagiano o un pavone o un uccello del paradiso maschio acquistano attrattive sessuali, anche a costo della propria vita, possono ancora trasmettere le proprie qualità di attrazione sessuale grazie al successo nella procreazione prima di morire. Egli si rese conto che la splendida coda di un pavone può essere d'ostacolo al suo possessore per quanto concerne la sopravvivenza, e suggerì che questo svantaggio sia più che controbilanciato dall'accresciuta attrattiva sessuale che una tale coda dà al maschio. Con la sua passione per l'analogia con la domesticazione, Darwin paragonò la femmina a un allevatore umano che dirige il corso dell'evoluzione degli animali domestici facendosi ispirare da capricci di carattere estetico.

Noi possiamo paragonare la femmina che sceglie un partner sessuale alla persona che seleziona biomorfi creati da un programma per computer preferendo le forme più attraenti dal punto di vista estetico.

Darwin accettò semplicemente i capricci della femmina come un dato. La loro esistenza era un assioma della sua teoria della selezione sessuale, un assunto prioritario piuttosto che qualcosa che debba essere spiegato con riferimento a qualcos'altro. Anche per questa ragione la sua teoria della selezione sessuale cadde in parte in discredito, finché non fu riabilitata da Fisher nel 1930.

Purtroppo molti biologi o ignorarono o fraintesero Fisher. L'obiezione sollevata da Julian Huxley e da altri era che i capricci della femmina non erano basi legittime per una teoria veramente scientifica. Fisher riabilitò però la teoria della selezione sessuale trattando la preferenza della femmina come un oggetto legittimo della selezione naturale, non meno della coda del maschio. La preferenza della femmina è una manifestazione del sistema nervoso femminile. Il sistema nervoso della femmina si sviluppa sotto l'influenza dei suoi geni, ed è perciò probabile che sia stato influenzato dalla selezione nel corso delle generazioni precedenti. Mentre altri autori avevano pensato che gli ornamenti maschili si fossero evoluti sotto l'influenza di una preferenza femminile statica, Fisher concepì una preferenza femminile che si evolveva dinamicamente di pari passo con gli ornamenti maschili. Forse il lettore può già cominciare a vedere in che modo tutto questo stia per connettersi con l'idea di una retroazione positiva esplosiva.

Quando si discutono idee teoriche difficili è spesso bene tenere a mente un esempio particolare tratto dal mondo reale. Io userò come esempio un uccello africano dalla lunga coda, chiamato

«vedova». Qualsiasi ornamento scelto da un partner femminile avrebbe fatto altrettanto al caso mio, e ho preferito evitare il pavone, onnipresente in ogni discussione della selezione sessuale. Il maschio della vedova è un uccello nero snello delle dimensioni di un tordo, con macchie di colore arancione alle spalle; le penne principali della coda però, nella stagione della riproduzione, possono raggiungere la lunghezza di 45 centimetri. Lo si può spesso osservare mentre compie il suo spettacolare volo di esibizione sopra le praterie dell'Africa, facendo acrobazie, con la lunga coda che lo fa assomigliare a un piccolo aereo da turismo che porti al traino un lungo striscione pubblicitario. Non sorprende che, quando piove, esso sia costretto a restare al suolo. Una coda così lunga dev'essere un carico pesante da portarsi dietro persino quando è asciutta. Noi siamo interessati a spiegare l'evoluzione della lunga coda, che congetturiamo sia stata un processo evolutivo esplosivo. Il nostro punto di partenza, perciò, è un uccello ancestrale non dotato di una coda lunga. Si pensi a una coda ancestrale lunga 9 centimetri, un sesto circa della lunghezza della coda del maschio moderno nella stagione della riproduzione. Il mutamento evolutivo che stiamo cercando di spiegare è un aumento di sei volte nella lunghezza della coda.

E un fatto ovvio che, qualsiasi cosa decidiamo di misurare negli animali, anche se la maggior parte dei membri di una specie sono abbastanza vicini alla media ci sarà sempre qualche individuo un po' al di sopra della media, mentre altri saranno un po' al di sotto della media. Possiamo essere certi che nella vedova ancestrale doveva esserci un certo ambito di variazione nella lunghezza della coda del maschio, la quale in alcuni casi doveva essere più lunga e in altri più corta rispetto alla lunghezza media di 9 centimetri. Si può supporre senza tema di errore che la lunghezza della coda doveva essere controllata da un gran numero di geni, ciascuno dei quali produceva un piccolo effetto, e che tali effetti si sommassero, assieme agli effetti della dieta e di altre variabili ambientali, per produrre la lunghezza della coda reale di ciascun individuo. Un gran numero di geni i cui effetti si sommano si dicono poligeni. La maggior parte delle misure del nostro corpo, per esempio la statura e il peso, sono soggette all'influenza di un gran numero di poligeni. Il modello matematico della selezione sessuale che sto seguendo più da vicino, quello di Russell Lande, è un modello di poligeni.

Ora dobbiamo volgere la nostra attenzione alle femmine, e al modo in cui scelgono il loro partner. Può sembrare una posizione sessista supporre che siano le femmine a scegliere i maschi, piuttosto che viceversa. In realtà, ci sono buone ragioni teoriche per attendersi che sia così (cfr. Il gene egoista) e di fatto questo è quanto avviene normalmente. Senza dubbio i maschi delle moderne vedove attraggono harem di cinque o sei femmine. Ciò significa che nella popolazione esiste un'eccedenza di maschi che non si riproducono, cosicché le femmine non hanno alcuna difficoltà a trovare partner sessuali e sono in condizione di essere esigenti. Un maschio ha molto da guadagnare dal fatto di essere attraente per le femmine, mentre una femmina ha poco da guadagnare dal fatto di essere attraente per i maschi, dato che essa sarebbe in ogni caso ricercata.

Così, avendo accettato l'assunto che sono le femmine a scegliere, possiamo fare a nostra volta il passo cruciale compiuto da Fisher, con cui egli confuse i critici di Darwin. Anziché prendere semplicemente per buona la tesi che le femmine abbiano dei capricci, consideriamo la preferenza femminile come una variabile influenzata da una base genetica, esattamente come qualsiasi altra. La preferenza espressa dalle femmine è una variabile quantitativa, e noi possiamo supporre che essa sia soggetta al controllo di poligeni, esattamente nello stesso modo in cui lo è la lunga coda del maschio. Questi poligeni possono agire su una qualsiasi di una grande varietà di parti del cervello femminile, o persino sui suoi occhi; su qualsiasi cosa che abbia l'effetto di modificare la preferenza della femmina. Questa preferenza tiene conto senza dubbio di molte parti del maschio, della macchia di colore sulla sua spalla, della forma del suo becco, e via dicendo; ma noi qui siamo interessati all'evoluzione della lunghezza della sua coda, e perciò siamo interessati alle preferenze delle femmine per code maschili di diversa lunghezza. Possiamo misurare perciò la preferenza femminile esattamente nelle stesse unità di misura in cui misuriamo la lunghezza della coda maschile, in centimetri. I poligeni faranno sì che ci siano femmine con una preferenza per code maschili più lunghe della media, altre con una preferenza per code più corte della media, e altre ancora con una preferenza per code di lunghezze attorno alla media.

Veniamo ora a una delle idee chiave dell'intera teoria. Benché i geni per la preferenza femminile si

esprimano solo nel comportamento femminile, essi sono nondimeno presenti anche nel corpo dei maschi. E, per la stessa ragione, i geni per la lunghezza della coda maschile sono presenti anche nel corpo delle femmine, indipendentemente dal fatto che trovino o no espressione nelle femmine stesse. L'idea di geni che non si esprimano non presenta alcuna difficoltà. Se un uomo ha i geni per un pene lungo, è altrettanto probabile che trasmetta quei geni alla figlia quanto al figlio. Il figlio potrà esprimere quei geni, mentre la femmina ovviamente non potrà, non avendo un pene. Ma se l'uomo avrà infine dei nipotini, i figli di sua figlia avranno probabilità altrettanto buone di ereditare il suo pene lungo quanto i figli di suo figlio. I geni possono essere trasportati in un corpo anche senza essere espressi. Nello stesso modo, Fisher e Lande suppongono che i geni per la preferenza femminile siano presenti anche nel corpo maschile, pur venendo espressi solo nel corpo femminile. E i geni per la coda del maschio sarebbero presenti anche nel corpo della femmina, pur non trovando espressione in esso.

Supponiamo ora di avere uno speciale microscopio che ci consenta di guardare all'interno delle cellule di ogni vedova e di ispezionarne i geni. Prendiamo un maschio che abbia una coda più lunga della media, e guardiamo i suoi geni, all'interno delle sue cellule. Osservando dapprima i geni per la lunghezza della coda stessa, non ci sorprende di scoprire che esso possiede i geni per la produzione di una coda lunga: in questo non c'è niente di strano, dal momento che esso ha una coda lunga. Ma consideriamo ora i geni per la preferenza della coda. Noi non abbiamo alcun indizio dall'esterno, dal momento che tali geni si esprimono solo nelle femmine. Dobbiamo cercarli col nostro microscopio. Che vedremo? Vedremo i geni che fanno preferire alle femmine i maschi dalla coda lunga.

Inversamente, se osservassimo all'interno di un maschio che avesse la coda corta, vedremmo i geni che fanno preferire alle femmine i maschi dalla coda corta. Questo è in effetti un punto chiave nel nostro ragionamento. Ed ecco quale ne è la giustificazione.

Se io sono un maschio dalla coda lunga, è probabile che anche mio padre abbia avuto una coda lunga. Questa è solo una comune trasmissione ereditaria. Ma, dato che mio padre è stato scelto come partner da mia madre, è probabile anche che mia madre preferisca i maschi dalla coda lunga. Perciò, se io ho ereditato i geni per la coda lunga da mio padre, è probabile che abbia ereditato anche i geni per preferire la coda lunga da mia madre. Per lo stesso ragionamento, se tu hai ereditato i geni per una coda corta, è probabile che tu abbia ereditato anche i geni responsabili per la preferenza, nella femmina, per maschi dalla coda corta.

Possiamo ripetere lo stesso tipo di ragionamento per le femmine. Se io sono una femmina che preferisce i maschi dalla coda lunga, è probabile che anche mia madre preferisse i maschi dalla coda lunga. E perciò probabile che mio padre avesse una coda lunga, essendo stato scelto da mia madre. Perciò, se io ho ereditato geni per preferire la coda lunga, è probabile che abbia ereditato anche i geni per avere una coda lunga, anche se questi geni non possono in realtà esprimersi nel mio corpo femminile.

E se io ho ereditato geni per preferire la coda corta, è probabile che io abbia ereditato anche geni per avere una coda corta. La conclusione generale è questa. Ogni individuo, di qualsiasi sesso, è probabile che contenga al tempo stesso tanto i geni per far sì che i maschi abbiano una certa qualità, quanto i geni per far sì che le femmine preferiscano quella stessa qualità nel maschio, quale che essa possa essere.

Così, i geni per le qualità maschili e i geni per far preferire quelle qualità alle femmine non saranno mescolati a caso nella popolazione, ma tenderanno a essere connessi. Questa connessione, che va sotto il nome tecnico scoraggiante di squilibrio da associazione, presenta effetti curiosi nelle equazioni dei genetisti matematici. Essa ha conseguenze strane e mirabili, una delle più notevoli delle quali, se hanno ragione Fisher e Lande, è l'evoluzione esplosiva della coda dei pavoni e degli uccelli vedova, e di una quantità di altri organi che esercitano un'attrazione sessuale sulle femmine. Queste conseguenze possono essere dimostrate solo per mezzo di formule matematiche, ma possono essere descritte anche a parole, cosicché si può tentare di dare un'idea del ragionamento matematico in linguaggio non matematico. Occorre nondimeno che calziamo le nostre scarpette da corsa mentali, anche se forse gli scarponi da scalata sarebbero un'analogia migliore. Ogni passo nel ragionamento è abbastanza semplice, ma c'è una lunga serie di passi da compiere su per la

montagna della comprensione, e se si tralascia uno dei passi precedenti non si possono purtroppo compiere i successivi.

Finora abbiamo riconosciuto la possibilità di una gamma completa di preferenze femminili, dalle femmine con una passione per i maschi dalla coda lunga sino alle femmine con gusti opposti, ossia con una predilezione per i maschi dalla coda corta. Se però facessimo un sondaggio fra le femmine di una particolare popolazione, troveremmo con ogni probabilità che la maggioranza delle femmine condivide gli stessi gusti in fatto di maschi. Possiamo esprimere l'ambito di variazione dei gusti femminili nella popolazione nelle stesse unità - centimetri - in cui abbiamo espresso l'ambito di variazione della lunghezza della coda maschile. E nella stessa unità dei centimetri possiamo esprimere la preferenza femminile media. Potrebbe risultare che la preferenza femminile media è esattamente uguale alla lunghezza media della coda dei maschi, 9 centimetri in entrambi i casi. In questo caso la scelta femminile non sarà una forza evolutiva tendente a modificare la lunghezza della coda dei maschi. Oppure potrebbe risultare che la preferenza femminile media va a una coda di lunghezza considerevolmente maggiore rispetto alla lunghezza media della coda reale dei maschi, ossia per esempio a una coda di 12 centimetri anziché di 9. Lasciando in sospeso, per il momento, il problema di quale potrebbe essere la ragione di tale discrepanza, limitiamoci ad accettarne l'esistenza e poniamoci l'ovvia domanda seguente. Perché, se la maggior parte delle femmine preferiscono i maschi con una coda di 12 centimetri, la maggioranza dei maschi ha una coda di 9 centimetri? Perché la lunghezza media della coda nella popolazione non passa a 12 centimetri sotto l'influenza della selezione sessuale delle femmine? Come può esserci una discrepanza di 3 centimetri fra la lunghezza della coda preferita media e la lunghezza della coda reale media?

La risposta è che il gusto femminile non è l'unico tipo di selezione che incida sulla lunghezza della coda del maschio. La coda ha una funzione importante da assolvere in volo e una coda troppo lunga o troppo corta diminuirà l'efficienza del volo. Inoltre una coda lunga comporta un dispendio di energie maggiore per portarsela in giro, e ancor più per produrla. I maschi con una coda lunga 12 centimetri possono esercitare un'attrazione maggiore sulle femmine, ma a prezzo di un'efficienza minore nel volo, di maggiori costi di energie e di una maggiore vulnerabilità ai predatori. Possiamo esprimere questo concetto dicendo che c'è un optimum utilitario della lunghezza della coda, che è diverso dall'optimum cui tende la selezione sessuale. Esiste cioè una lunghezza della coda ideale dal punto di vista dei criteri usuali di utilità: una lunghezza della coda che è ideale da tutti i punti di vista tranne da quello dell'attrazione esercitata sulle femmine.

Dobbiamo dunque attenderci che la lunghezza media della coda reale nei maschi, di 9 centimetri nel nostro esempio ipotetico, coincida con l'optimum utilitario? No: dobbiamo attenderci invece che l'optimum utilitario sia inferiore alla media; diciamo che una coda ottimale dovrebbe essere lunga, in media, 6 centimetri. La ragione di questo fatto è che la lunghezza media della coda reale di 9 centimetri è il risultato di un compromesso fra la selezione utilitaria, tendente a rendere la coda più corta, e la selezione sessuale, tendente a renderla più lunga. Possiamo sospettare che, se non ci fosse alcun bisogno di attrarre le femmine, la lunghezza media della coda diminuirebbe verso i 6 centimetri. Se non ci fosse bisogno di preoccuparsi dell'efficienza del volo e dei costi di energia, la lunghezza media della coda scatterebbe verso i 12 centimetri. La lunghezza media reale di 9 centimetri è dunque un compromesso fra queste due esigenze.

Abbiamo lasciato da parte il problema del perché le femmine potrebbero essere d'accordo nel preferire una coda che si discostasse da un optimum utilitario. A prima vista quest'idea sembra sciocca. Le femmine sensibili alla moda, con una passione per code più lunghe di quanto dovrebbero essere sulla base di sani criteri di progettazione, sono destinate ad avere figli mal progettati, inefficienti, incapaci di volare con maestria. Ogni femmina mutante, non sensibile alla moda, che dovesse preferire maschi dalla coda più corta, e in particolare una femmina mutante il cui gusto in fatto di coda dovesse coincidere con l'optimum utilitario, produrrebbe figli efficienti, ben progettati per il volo, che supererebbero senza dubbio i figli delle sue rivali più sensibili alla moda. Ma proprio qui sta il guaio. Esso è implicito nella mia metafora della «moda». I figli della femmina mutante possono essere efficienti volatori, ma non sono considerati attraenti dalla maggior parte

delle femmine della popolazione. Essi attrarranno solo una minoranza di femmine, e precisamente le femmine che sfidano la moda; e le femmine appartenenti a una minoranza sono, per definizione, più difficili da trovare delle femmine della maggioranza, per la semplice ragione che sono distribuite in modo più rarefatto nel territorio.

In una società in cui solo un maschio su sei riesce ad accoppiarsi e in cui i maschi fortunati hanno grandi harem, il fatto di incontrare i gusti della maggioranza delle femmine comporterà sempre benefici enormi, benefici che potrebbero superare di gran lunga i costi utilitari in energia ed efficienza di volo.

Ma anche ammesso tutto questo, potrebbe obiettare il lettore, l'intero ragionamento si fonda su un assunto arbitrario. Dato che la maggior parte delle femmine preferiscono code lunghe non utilitarie, il lettore dovrà ammettere che ne segue tutto il resto. Ma perché la maggior parte delle femmine hanno adottato questa preferenza? Perché non hanno preferito code più corte dell'optimum utilitario, o esattamente della stessa lunghezza dell'optimum utilitario? Perché mai la moda non dovrebbe coincidere con l'utilità? La risposta è che in realtà sarebbe potuta accadere una qualsiasi di queste cose, e in molte specie questo fu effettivamente ciò che accadde. Il mio esempio ipotetico delle femmine che preferiscono i maschi dalla coda lunga è in effetti arbitrario. Ma quale che fosse il gusto della maggioranza delle femmine, e per quanto arbitrario, ci sarebbe stata una tendenza alla conservazione, per opera della selezione, del carattere preferito da quella maggioranza, o persino, in certe condizioni, a un suo accrescimento, fino all'esagerazione. A questo punto del ragionamento la mancanza di una giustificazione matematica nella mia esposizione diventa avvertibile. Io potrei rimandare semplicemente il lettore al ragionamento matematico di Lande, e fermarmi qui. Questa potrebbe essere per me la decisione più saggia, ma farò un tentativo di spiegare una parte dell'idea a parole.

La chiave del ragionamento risiede nell'osservazione che abbiamo fatto in precedenza a proposito dello «squilibrio da associazione», la «connessione» fra i geni per le code di una data lunghezza - di qualsiasi lunghezza - e i geni corrispondenti che determinano la preferenza per code di quella stessa lunghezza.

Noi possiamo concepire questo «fattore di connessione» come un numero misurabile. Se il fattore di connessione è molto elevato, ciò significa che la conoscenza dei geni di un individuo per la lunghezza della coda ci consente di predire, con grande precisione, i suoi geni per la preferenza, e viceversa. Inversamente, se il fattore di connessione è basso, ciò significa che la conoscenza dei geni di un individuo in uno dei due ambiti - preferenza o lunghezza della coda - può darci solo una vaga indicazione sui suoi geni nell'altro ambito.

Gli elementi che incidono sulla grandezza del fattore di connessione sono la forza della preferenza delle femmine: il grado di tolleranza che esse manifestano nei confronti di quelli che vedono come maschi imperfetti; la misura in cui la variazione nella lunghezza della coda dei maschi è governata da geni in opposizione a fattori ambientali, e via dicendo. Se, in conseguenza di tutti questi effetti, il fattore di connessione - l'intensità del legame che unisce i geni per la lunghezza della coda e i geni per la preferenza nella lunghezza della coda - è molto forte, possiamo dedurre la seguente conclusione. Ogni volta che un maschio viene scelto a causa della sua lunga coda, non vengono scelti solo i geni per la coda lunga. A causa della loro stretta connessione, vengono scelti nello stesso tempo anche i geni per la preferenza per la coda lunga. Ciò significa che i geni che inducono le femmine a scegliere code maschili di una certa lunghezza stanno in effetti scegliendo copie di se stessi. Questo è un ingrediente essenziale in un processo autorinforzantesi: esso ha una propria inerzia che tende alla propria conservazione. Una volta che l'evoluzione abbia cominciato a muoversi in una particolare direzione, quest'inerzia può tendere, di per sé, a farla persistere nella stessa direzione.

Un altro modo per considerare questi concetti è nei termini di quello che è diventato noto come l'«effetto della barba verde». Quest'effetto è una sorta di scherzo biologico accademico; esso è puramente ipotetico, ma nondimeno istruttivo. Fu proposto in origine come un modo per spiegare il principio fondamentale che è alla base dell'importante teoria di W.D. Hamilton della selezione per consanguinei, da me discussa a lungo nel *Gene egoista*. Hamilton, che è oggi mio collega a Oxford,

dimostrò che la selezione naturale favorisce i geni per il comportamento altruistico verso i consanguinei stretti, semplicemente perché copie di quegli stessi geni hanno un'alta probabilità di trovarsi nei consanguinei. L'ipotesi della «barba verde» ribadisce lo stesso concetto in modo più generale, anche se meno pratico. La consanguineità, dice questo ragionamento, è solo un modo possibile in cui dei geni possono localizzare copie di se stessi in altri corpi. In teoria, un gene potrebbe localizzare copie di se stesso in modi più diretti. Supponiamo che abbia origine un gene che presenti i due effetti seguenti (i geni con due o più effetti sono comuni): quello di dare ai suoi possessori un carattere distintivo vistoso, come una barba verde, e al tempo stesso al loro cervello una tendenza a comportarsi altruisticamente verso gli individui dalla barba verde. Una coincidenza piuttosto improbabile - non stento ad ammetterlo -, ma se essa dovesse mai verificarsi la sua conseguenza sull'evoluzione sarebbe chiara. Il gene dell'altruismo verso la barba verde tenderebbe a essere favorito dalla selezione naturale, esattamente per gli stessi tipi di ragioni per cui sono favoriti i geni per l'altruismo verso la prole o verso i fratelli. Ogni volta che un individuo dalla barba verde ne aiutasse un altro, il gene per questo altruismo discriminante favorirebbe una copia di se stesso. La diffusione del gene per la barba verde sarebbe automatica e inevitabile.

Nessuno crede veramente, neppure io, che l'effetto della barba verde, in questa forma ultrasemplice, si troverà mai in natura. In natura i geni discriminano a favore di copie di se stessi per mezzo di etichette meno specifiche ma più plausibili di quelle della barba verde. La consanguineità è per l'appunto una di tali etichette. «Fratello» o, in pratica, qualcosa di simile a «quello che è appena uscito dall'uovo nello stesso nido in cui sono stato allevato io stesso», è un'etichetta statistica. Ogni gene che induca gli individui a comportarsi altruisticamente verso i portatori di una tale etichetta ha una buona probabilità statistica di aiutare copie di se stesso, giacché i fratelli hanno una buona probabilità statistica di condividere geni. La teoria di Hamilton della selezione per consanguinei può essere vista come un modo in cui può essere reso plausibile un effetto del tipo di quello della barba verde. Ricordiamo, per inciso, che qui non si suggerisce affatto che i geni «vogliano» aiutare copie di se stessi. Solo che ogni gene che si trovi ad avere l'effetto di aiutare copie di se stesso tenderà, volente o nolente, a diventare più numeroso nella popolazione.

La consanguineità può essere vista quindi come un modo in cui può essere reso plausibile qualcosa di simile all'effetto della barba verde. La teoria della selezione sessuale di Fisher può essere spiegata come un altro modo ancora in cui la barba verde può essere resa plausibile. Quando le femmine di una popolazione hanno forti preferenze per determinate caratteristiche maschili, ne segue, in virtù del ragionamento che abbiamo visto, che ogni corpo maschile tenderà a contenere copie dei geni che fanno preferire alle femmine le sue caratteristiche. Se un maschio ha ereditato dal padre una coda lunga, è probabile che abbia ereditato dalla madre anche i geni che l'hanno indotta a scegliere la coda lunga del padre. Se il maschio ha invece ereditato dal padre una coda corta, è probabile che abbia ricevuto nel contempo dalla madre i geni che fanno preferire alle femmine le code corte. Così, quando una femmina sceglie un maschio, quale che sia la sua preferenza, è probabile che i geni che influiscono sulla sua scelta stiano scegliendo copie di se stessi nel maschio. Essi scelgono copie di se stessi usando come etichetta la coda lunga maschile, in una versione più complicata del modo in cui gli ipotetici geni della barba verde usano come etichetta la barba verde.

Se metà delle femmine nella popolazione preferissero maschi dalla coda lunga, e l'altra metà maschi dalla coda corta, i geni per la scelta del maschio nelle femmine starebbero ancora scegliendo copie di se stessi, ma non ci sarebbe in generale alcuna tendenza a favorire l'uno o l'altro tipo di coda. Potrebbe esserci una tendenza per la popolazione a scindersi in due: una fazione con la coda lunga e con la preferenza per la coda lunga, e una fazione con la coda corta e con la preferenza per la coda corta.

Ma una qualsiasi siffatta scissione in due dell'«opinione» femminile creerebbe una situazione di instabilità. Nel momento in cui cominciasse a formarsi fra le femmine una maggioranza, per quanto lieve, a favore di un tipo di preferenza anziché per l'altro, nelle successive generazioni tale maggioranza tenderebbe a rafforzarsi. Questo perché i maschi preferiti dalle femmine della scuola di pensiero minoritaria avrebbero figli che incontrerebbero una relativa difficoltà a trovare partner, cosicché le femmine della minoranza avrebbero meno nipotini. Ogni volta che piccole minoranze

tendono a diventare minoranze ancora più piccole, e che piccole maggioranze tendono a diventare maggioranze più grandi, abbiamo una ricetta per una retroazione positiva: «A chiunque ha sarà dato, e sarà nell'abbondanza; ma a chiunque non ha, sarà tolto anche quello che ha». Ogni volta che ci troviamo di fronte a un equilibrio instabile, arbitrario, gli inizi casuali si autorinforzano. Nello stesso modo, quando tagliamo il tronco di un albero, possiamo essere incerti se l'albero cadrà verso nord o verso sud; ma, dopo essere rimasto in bilico per un po' di tempo, una volta che abbia cominciato a cadere in una direzione nulla potrà farlo tornare indietro.

Allacciandoci in modo ancora più sicuro le nostre scarpe da montagna, ci prepariamo a piantare un altro chiodo da roccia.

Ricordiamo che la selezione per opera delle femmine attrae la coda dei maschi in una direzione, mentre la selezione «utilitaria» le attrae nell'altra (l'«attrazione» va intesa qui, ovviamente, in senso evolucionistico) e che la lunghezza media della coda è un compromesso fra le due attrazioni.

Riconosciamo ora una quantità detta «discrepanza di scelta». Questa è la differenza fra la lunghezza media reale della coda dei maschi nella popolazione e la lunghezza della coda «ideale» preferita dalla media delle femmine nella popolazione. Le unità in cui si misura la discrepanza di scelta sono arbitrarie, esattamente come lo sono le scale di temperatura Celsius e Fahrenheit. E come la scala Celsius trova conveniente fissare il suo punto zero in coincidenza con la temperatura di congelamento dell'acqua, così noi troveremo conveniente fissare il nostro zero nel punto in cui l'attrazione della selezione sessuale controbilancia esattamente l'attrazione opposta della selezione utilitaria. In altri termini, una discrepanza di scelta eguale a zero significa che il mutamento evolutivo viene ad arrestarsi perché i due tipi opposti di selezione si annullano reciprocamente.

È chiaro che, quanto maggiore è la discrepanza di scelta, tanto più forte è l'«attrazione» evolutiva esercitata dalle femmine di contro all'attrazione antagonistica della selezione naturale utilitaria. Ciò a cui noi siamo interessati non è il valore assoluto della discrepanza di scelta in un qualsiasi tempo particolare, bensì il modo in cui la discrepanza di scelta muta in generazioni successive. In conseguenza di una data discrepanza di scelta, le code diventano più lunghe e nello stesso tempo (si ricordi che i geni per la scelta di code lunghe vengono selezionati di concerto con i geni che determinano la formazione di una coda lunga) diventa più lunga anche la coda ideale preferita dalle femmine.

Dopo una generazione di questa selezione duplice, tanto la lunghezza media della coda reale quanto la lunghezza media della coda preferita saranno cresciute, ma quale delle due sarà cresciuta di più? Questo è un altro modo di chiedersi che cosa avverrà della discrepanza di scelta.

La discrepanza di scelta potrebbe restare uguale (se la lunghezza media della coda reale e la lunghezza media della coda preferita crescessero della stessa quantità). Potrebbe diventare più piccola (se la lunghezza media della coda reale crescesse più di quella della coda preferita). O, infine, potrebbe diventare più grande (se la lunghezza media della coda reale crescesse un po', ma la lunghezza media della coda preferita crescesse ancora di più). Possiamo cominciare a vedere che, se la discrepanza di scelta diventa sempre più piccola man mano che le code diventano più lunghe, la lunghezza della coda si evolverà verso una lunghezza stabile corrispondente a una situazione di equilibrio. Se invece la discrepanza di scelta diventa maggiore al crescere delle code, le generazioni future dovrebbero vedere in teoria le code diventare sempre più lunghe a una velocità crescente.

Questo è, senza alcun dubbio, ciò che Fisher deve aver calcolato prima del 1930, anche se le sue concise espressioni pubblicate sull'argomento non furono chiaramente intese da altri a quel tempo.

Consideriamo innanzitutto il caso in cui la discrepanza di scelta diminuisce sempre più al passare delle generazioni. Essa diventerà infine così piccola che l'attrazione della preferenza delle femmine in una direzione sarà controbilanciata esattamente dall'attrazione della selezione utilitaria nell'altra.

Il mutamento evolutivo si fermerà e si dirà che il sistema è in uno stato di equilibrio. La cosa interessante dimostrata in proposito da Lande è che, almeno in certe condizioni, non c'è un solo punto di equilibrio ma molti (teoricamente un numero infinito disposti lungo una linea retta in un grafico, ma ecco degli aspetti matematici su cui riflettere!); per ogni forza dell'attrazione della selezione utilitaria che tira in una direzione, la forza della preferenza delle femmine, in direzione contraria, si evolve a raggiungere un punto di perfetto equilibrio con essa.

Così, in presenza di condizioni tali che la discrepanza di scelta tende a diventare più piccola al passare delle generazioni, la popolazione perverrà alla stasi al punto di equilibrio «più vicino». Qui l'attrazione della selezione utilitaria in una direzione sarà controbilanciata esattamente dall'attrazione della selezione femminile nell'altra, e la coda dei maschi rimarrà della stessa lunghezza, quale che essa sia. Il lettore potrebbe riconoscere che qui ci troviamo di fronte a un sistema di retroazione negativa, ma di un tipo un po' strano. È sempre possibile riconoscere un sistema di retroazione negativa attraverso ciò che accade se si introduce una «perturbazione» che allontana il sistema dal suo «punto fisso» ideale. Se si perturba la temperatura di una stanza, per esempio aprendo la finestra, il termostato risponde accendendo il radiatore per tornare a una posizione di equilibrio.

Come potrebbe essere perturbato il sistema della selezione sessuale? Ricordiamo che stiamo parlando qui di fenomeni alla scala di tempo dell'evoluzione, cosicché è difficile per noi compiere esperimenti - l'equivalente di aprire la finestra - e vivere abbastanza per vedere i risultati. Senza alcun dubbio, però, in natura il sistema viene perturbato spesso, per esempio per opera di fluttuazioni spontanee, casuali, nel numero dei maschi in conseguenza di eventi casuali, fortunati o sfortunati. Ogni volta che ciò accade, date le condizioni che abbiamo discusso finora, una combinazione di selezione utilitaria e di selezione sessuale riporterà la popolazione al più vicino della serie di punti di equilibrio. Questo, probabilmente, non sarà lo stesso punto di equilibrio di prima, ma sarà un altro punto, un po' più in alto, o più in basso, lungo la linea dei punti di equilibrio. Così, al passare del tempo, la popolazione può salire o scendere lungo la linea dei punti di equilibrio. Salire lungo questa linea significa che la coda diventa più lunga: in teoria non c'è alcun limite alla lunghezza che essa può raggiungere. Scendere lungo la stessa linea significa che la coda diventa più corta: in teoria fino a zero.

Per spiegare l'idea di un punto di equilibrio viene spesso usata l'analogia di un termostato. Noi possiamo svilupparla per spiegare l'idea più difficile di una linea di equilibri. Supponiamo che una stanza abbia sia un impianto di riscaldamento sia un dispositivo di refrigerazione, ciascuno col suo proprio termostato. Entrambi i termostati sono regolati in modo tale da tenere la stanza alla stessa temperatura fissa di 20 gradi centigradi. Se la temperatura scende al di sotto di 20 gradi, l'impianto di riscaldamento si accende e il refrigeratore si spegne. Se la temperatura sale al di sopra di 20 gradi si accende il refrigeratore e si spegne il radiatore. L'analogo della lunghezza della coda nel maschio dell'uccello vedova non è la temperatura (che rimane pressa poco costante a 20°), bensì il consumo di elettricità. Il fatto è che ci sono una quantità di modi diversi in cui la temperatura desiderata può essere conseguita. Essa può essere raggiunta con i due impianti che lavorano a pieno regime, il radiatore emanando aria caldissima, e il refrigeratore lavorando al massimo per neutralizzare il calore. Oppure può essere ottenuta con i due impianti quasi inattivi. È chiaro che quest'ultima soluzione è quella più desiderabile dal punto di vista della bolletta dei consumi ma, per quanto concerne l'obiettivo di mantenere la temperatura stabile al livello di 20 gradi, ognuno di una grande serie di ritmi di lavoro è altrettanto soddisfacente. Abbiamo una linea di punti di equilibrio, più che un singolo punto. A seconda di vari particolari circa il modo in cui il sistema è stato progettato, di ritardi nel sistema e di altre cose di cui si preoccupano gli ingegneri, è teoricamente possibile che i consumi di elettricità nella stanza salgano e scendano lungo la linea dei punti di equilibrio, mentre la temperatura rimane la stessa. Se la temperatura della stanza viene perturbata un po' sotto i 20 gradi, essa tornerà alla temperatura prestabilita, ma non ritornerà necessariamente alla stessa combinazione di ritmi di lavoro dell'impianto di riscaldamento e di quello di refrigerazione. Essa potrebbe tornare a un punto diverso lungo la linea degli equilibri.

In termini di ingegneria pratica reale sarebbe piuttosto difficile regolare un sistema di riscaldamento e raffreddamento di una stanza in modo da rendere possibile una vera linea di equilibri. In pratica è probabile che quella linea si riduca a un punto. Anche il ragionamento di Russell Lande, su una linea di equilibri esistenti nella selezione sessuale, si fonda su assunti che potrebbero benissimo non essere veri in natura. Esso suppone, per esempio, che ci saranno di continuo nuove mutazioni. Suppone che l'atto di scegliere, da parte di una femmina, non comporti alcun costo. Se questo assunto viene violato, come può ben essere, la «linea» di equilibri finisce col ridursi a un singolo

punto di equilibrio. In ogni caso, però, finora ci siamo occupati solo del caso in cui la discrepanza di scelta diminuisce al passare delle successive generazioni su cui si esercita la selezione. In presenza di altre condizioni la discrepanza di scelta può aumentare.

Poiché è già un po' che abbiamo esaminato quest'argomento, facciamone un breve riepilogo.

Abbiamo una popolazione in cui i maschi stanno evolvendo qualche carattere, come la lunghezza della coda negli uccelli vedova, sotto l'influenza di due tendenze antagonistiche, la preferenza delle femmine per code più lunghe e la selezione utilitaria, che propende per code più corte.

La ragione per cui nell'evoluzione si manifesta una propensione per code più lunghe è che, ogni volta che una femmina sceglie un maschio del tipo che «preferisce», lo fa a causa di un'associazione non casuale di geni, scegliendo copie di quegli stessi geni che la inducono a tale scelta. Così, nella generazione seguente, non solo i maschi tenderanno ad avere la coda più lunga, ma le femmine tenderanno ad avere una più forte preferenza per la coda lunga. Non è chiaro quale di questi due processi di accrescimento presenterà un ritmo di aumento maggiore, da una generazione all'altra.

Finora abbiamo considerato il caso in cui la lunghezza della coda aumenti, da una generazione all'altra, più rapidamente della preferenza per la coda lunga. Ora veniamo a considerare l'altro caso possibile, in cui sia la preferenza ad aumentare, da una generazione all'altra, più rapidamente della lunghezza della coda. In altri termini, ci accingiamo ora a esaminare il caso in cui la discrepanza di scelta aumenti al passare delle generazioni, anziché diminuire come nel caso considerato nei paragrafi precedenti.

Qui le conseguenze teoriche sono ancora più bizzarre di prima. In luogo di una retroazione negativa, abbiamo una retroazione positiva. Al passare delle generazioni la coda diventa più lunga, ma il desiderio femminile per code lunghe aumenta a un ritmo ancora maggiore. Ciò significa che, teoricamente, la lunghezza della coda è destinata ad aumentare ancora, e a un ritmo sempre più accelerato al passare delle generazioni. In teoria la coda continuerà a crescere persino dopo aver raggiunto la bella lunghezza di 10 chilometri. In pratica, ovviamente, le regole del gioco cambieranno molto tempo prima di raggiungere queste lunghezze assurde, proprio come la nostra macchina a vapore, col suo regolatore di Watt del flusso di vapore invertito, non potrebbe mai accelerarsi in realtà sino a raggiungere un milione di giri al secondo. Ma anche se, quando consideriamo casi estremi, dobbiamo molto diluire le conclusioni del modello matematico, queste potrebbero ben valere per un certo ambito di condizioni plausibili in pratica.

Ora, a distanza di mezzo secolo, possiamo capire quel che intendeva dire Fisher quando affermava senza peli sulla lingua che «è facile vedere che la velocità di sviluppo sarà proporzionale allo sviluppo già raggiunto, che aumenterà perciò col tempo in modo esponenziale, ossia in progressione geometrica». Quando Fisher scrisse: «Lo sviluppo del piumaggio nel maschio, e la preferenza sessuale per tali sviluppi nella femmina, devono quindi avanzare assieme e, finché questo processo non sia controllato da una severa selezione contraria, avanzeranno con velocità sempre crescente», la sua ragione fondamentale era chiaramente la stessa che sarebbe stata espressa in seguito da Lande.

Il fatto che Fisher e Lande siano pervenuti entrambi, mediante il ragionamento matematico, alla stessa interessante conclusione, non significa che la loro teoria sia un riflesso corretto di ciò che avviene in natura. Potrebbe darsi, come ha detto il genetista dell'Università di Cambridge Peter O'Donald, una fra le principali autorità sulla teoria della selezione sessuale, che la proprietà di uno sviluppo sfrenato presente nel modello di Lande, fosse già «incorporata» nei suoi assunti iniziali, così che essa non potesse fare a meno di emergere, in modo piuttosto tedioso, all'altro estremo del ragionamento matematico. Alcuni teorici, fra cui Alan Grafen e W.D. Hamilton, preferiscono tipi di teoria alternativi in cui una scelta fatta da una femmina ha effettivamente un effetto benefico sulla sua progenie, in un senso utilitario, eugenico. La teoria su cui essi stanno lavorando assieme è che le femmine fanno una sorta di diagnosi medica, scegliendo quelli, fra i maschi, che sono meno soggetti a parassiti. Un piumaggio brillante, secondo questa teoria particolarmente ingegnosa di Hamilton, è il modo usato dal maschio per segnalare in modo vistoso il suo stato di buona salute. Sarebbe troppo lungo fornire una spiegazione adeguata dell'importanza teorica dei parassiti. In breve la difficoltà, nel caso di tutte le teorie «eugeniche» della scelta femminile, è sempre stata la

seguente. Se le femmine fossero realmente in grado di scegliere i maschi con i geni migliori, il loro stesso successo ridurrebbe la gamma di scelte disponibili in futuro: infine, quando non fossero presenti altro che buoni geni, la scelta non avrebbe più alcuna utilità. I parassiti eliminano questa obiezione teorica. La ragione è che, secondo Hamilton, parassiti e ospiti conducono una corsa agli armamenti ciclica incessante gli uni contro gli altri. Ciò significa, a sua volta, che i geni «migliori» in ogni generazione di uccelli non sono identici ai geni migliori di generazioni future. Quel che si richiede per sconfiggere la generazione di parassiti corrente non sarà necessariamente efficace contro la nuova generazione di parassiti che vanno evolvendosi. Ci saranno perciò sempre dei maschi che saranno geneticamente meglio equipaggiati di altri per sconfiggere l'attuale generazione di parassiti. Le femmine potranno, perciò, beneficiare sempre la loro prole scegliendo i maschi più sani della generazione corrente. Gli unici criteri generali che generazioni successive di femmine potranno usare sono gli stessi indicatori che potrebbe usare un qualsiasi veterinario: occhi brillanti, piumaggio lucente e così via. Solo maschi veramente sani possono sfoggiare questi sintomi di salute, cosicché la selezione favorisce quei maschi che possono manifestarli appieno, e persino esageratamente, nella lunga coda, che spesso si apre a ventaglio, come quella del pavone.

Ma la teoria dei parassiti, anche se potrebbe essere giusta, esorbita dal tema del mio capitolo sulle «esplosioni». Tornando alla teoria della crescita incontrollata di Fisher-Lande, ciò di cui abbiamo bisogno sono prove tratte dall'osservazione di animali reali. Dove dovremmo andare a cercare tali prove? Quali metodi potremmo usare? Un approccio promettente fu fornito dallo svedese Malte Andersson. Si dà il caso che egli abbia lavorato proprio sullo stesso uccello usato qui da me per discutere le idee teoriche, ossia l'uccello vedova, che egli studiò nel suo ambiente naturale in Kenia. Gli esperimenti di Andersson furono resi possibili da un recente progresso tecnologico: i superadesivi. Egli ragionò nel modo seguente. Se è vero che la lunghezza della coda reale dei maschi è un compromesso fra un optimum utilitario da un lato e ciò che desiderano le femmine dall'altro, dovrebbe essere possibile «costruire» un maschio superattraente dandogli una coda eccezionalmente lunga. È a questo punto che entra in gioco il superadesivo. Descriverò in breve l'esperimento di Andersson, che è un bell'esempio di progettazione di un esperimento.

Andersson catturò 36 maschi e li divise in nove gruppi di quattro. Ogni gruppo fu trattato in modo simile. A un membro di ciascun gruppo di quattro (scelto in modo scrupolosamente casuale per evitare ogni discriminazione inconscia) furono tagliate le penne della coda fino a ridurle alla lunghezza di 14 centimetri. La parte eliminata fu attaccata, con la supercolla a pronta presa, all'estremità della coda del secondo membro del gruppo di quattro. Così il primo uccello del gruppo ebbe una coda accorciata artificialmente, il secondo una artificialmente allungata. Il terzo uccello fu lasciato con la coda intatta per confronto. Anche il quarto uccello fu lasciato con la coda della stessa lunghezza, con la differenza però che in questo caso una parte delle penne della coda, prima tagliate, furono poi attaccate con la colla. Questo potrebbe sembrare un esercizio inutile, ma è un buon esempio di quanta cura si debba mettere nella progettazione degli esperimenti. Poteva darsi che a influire su un uccello fosse il fatto di aver subito una manipolazione delle penne della coda, o il fatto di essere stato catturato e manipolato da un essere umano, piuttosto che il mutamento nella lunghezza stessa delle penne. Il gruppo 4 fu usato come gruppo di controllo per la verifica di tali effetti.

L'idea era quella di confrontare il successo nell'accoppiamento di ogni uccello con i suoi colleghi trattati diversamente nel suo gruppo di quattro. Dopo essere stato trattato in uno dei quattro modi diversi, ogni maschio poté tornare alla sua vita normale. Ogni uccello riprese la sua attività usuale di cercare di attrarre femmine nel suo territorio, per indurle alla copula, alla costruzione di un nido e alla deposizione delle uova. L'interrogativo era: quale membro di ciascun gruppo avrebbe avuto il massimo successo nell'attrarre femmine? Andersson misurò questo successo, non letteralmente osservando le femmine, ma attendendo e poi contando il numero di nidi contenenti uova nel territorio di ciascun maschio. Egli trovò che i maschi dalla coda artificialmente allungata attraevano un numero di femmine circa quattro volte maggiore rispetto ai maschi dalla coda artificialmente accorciata. Quelli con la coda di lunghezza normale, naturale, avevano un successo intermedio. I risultati furono analizzati statisticamente, per verificare che non potessero essere prodotti dal solo

caso. La conclusione fu che, se l'attrarre femmine fosse stato l'unico criterio, i maschi dalla coda lunga se la sarebbero cavata meglio di quanto non accadeva normalmente. In altri termini, la selezione sessuale sta esercitando una pressione costante nella direzione di un allungamento della coda. Il fatto che le code vere siano più corte di come le vorrebbero le femmine suggerisce che debba essere all'opera qualche altra pressione selettiva che tende a mantenerle più corte. Questa è la selezione «utilitaria». È presumibile che i maschi dalla coda particolarmente lunga siano più soggetti a morire dei maschi dalla coda media. Purtroppo Andersson non ebbe il tempo di seguire la sorte successiva dei maschi da lui «truccati». Se lo avesse fatto, si sarebbe potuto predire che i maschi dalla coda artificialmente allungata sarebbero morti, in media, più giovani dei maschi normali, probabilmente a causa di una maggiore vulnerabilità nei confronti dei predatori.

Quanto ai maschi dalla coda artificialmente accorciata, ci si doveva verosimilmente attendere che vivessero più a lungo dei maschi normali, dato l'assunto che la lunghezza normale sia un compromesso fra l'optimum della selezione sessuale e l'optimum utilitario. È infatti presumibile che gli uccelli dalla coda artificialmente accorciata siano più vicini all'optimum utilitario, ed è quindi lecito supporre che dovrebbero vivere più a lungo. In tutto questo, però, c'è molto di ipotetico. Se il principale svantaggio utilitario di una coda lunga risultasse essere il costo economico di produrla, anziché i maggiori pericoli di morire dopo la sua produzione, i maschi che hanno ricevuto una coda eccezionalmente lunga su un piatto d'argento, come grazioso dono da Andersson, non dovrebbero invece morire particolarmente giovani.

Ho scritto come se la preferenza delle femmine tendesse a determinare invariabilmente un maggiore sviluppo della coda e di altri ornamenti. In teoria, come abbiamo visto in precedenza, non c'è alcuna ragione per cui la preferenza femminile non dovrebbe premere esattamente nella direzione opposta, ossia in direzione di un accorciamento, anziché di un allungamento, della coda. Il comune scricciolo o forasiepe ha una coda così corta e tozza che c'è da chiedersi se essa non sia forse più corta di quanto «dovrebbe» essere a fini strettamente utilitari. La competizione fra scriccioli maschi è intensa, come si può congetturare dalla sonorità sproporzionata del loro canto. Un tale canto dev'essere costoso, e si sa di uno scricciolo maschio che ha cantato, letteralmente, fino a morire. I maschi che hanno successo ospitano, come le vedove, più di una femmina nel loro territorio. In un tale clima competitivo, possiamo attenderci una retroazione positiva continua. La coda corta dello scricciolo potrebbe rappresentare il prodotto finale di un processo di costante contrazione evolutiva? Ma, tralasciando gli scriccioli, possiamo plausibilmente considerare la coda a ventaglio del pavone e la lunga coda delle vedove e delle paradisee, nella loro sgargiante prodigalità, i prodotti finali di un'evoluzione esplosiva, dall'andamento a spirale, alimentata dalla retroazione positiva. Fisher e i suoi successori moderni ci hanno dimostrato in che modo questo processo possa essersi innescato. Quest'idea è connessa essenzialmente alla selezione sessuale, oppure possiamo trovare analogie convincenti in altri tipi di evoluzione? Val la pena di porsi questa domanda, non foss'altro perché ci sono aspetti della nostra evoluzione che presentano un andamento esplosivo, in particolare il rapido sviluppo del nostro cervello durante gli ultimi milioni di anni. Qualcuno ha suggerito che anche questo sviluppo possa essere dovuto alla selezione sessuale, dato che l'intelligenza sarebbe un carattere sessualmente desiderabile (ovvero potrebbe essere desiderabile una qualche manifestazione dell'intelligenza, come la capacità di ricordare i passi di una danza rituale lunga e complessa). Le dimensioni del cervello potrebbero però essere esplose anche sotto l'influenza di un tipo diverso di selezione, analogo ma non identico alla selezione sessuale. Io penso che sia utile distinguere due livelli di una possibile analogia con la selezione sessuale, un'analogia debole e un'analogia forte.

L'analogia debole dice semplicemente quanto segue: ogni processo evolutivo in cui il prodotto finale di uno stadio dell'evoluzione fissa la scena per lo stadio seguente è potenzialmente progressivo, a volte in modo molto rapido. Noi ci siamo già imbattuti in quest'idea nel capitolo precedente, nella forma di «corse agli armamenti». Ogni miglioramento evolutivo nella struttura fisica dei predatori modifica le pressioni che si esercitano sulle prede, le quali tendono a loro volta a migliorarsi per potersi meglio sottrarre ai predatori. Da questa nuova situazione i predatori sono stimolati a migliorarsi ulteriormente, cosicché prende l'avvio una spirale tendente a crescere di

continuo.

Come abbiamo visto, è probabile che né predatori né prede vengano necessariamente a ottenere, in conseguenza di questi sviluppi, un successo migliore nella lotta contro i loro nemici, giacché anche questi vanno migliorando nello stesso tempo.

Prede e predatori stanno diventando nondimeno, in senso assoluto, sempre meglio equipaggiati.

Questa è, dunque, l'analogia debole con la selezione sessuale. L'analogia forte con la selezione sessuale si riferisce all'essenza della teoria della selezione sessuale di Fisher-Lande; questa consiste nel fenomeno, simile all'«effetto della barba verde», per cui i geni per la scelta femminile tendono automaticamente a scegliere copie di se stessi, un processo che ha una tendenza automatica a diventare esplosivo.

Non è chiaro se ci siano esempi di questo tipo di fenomeno oltre alla selezione sessuale stessa.

Io sospetto che un luogo privilegiato in cui cercare analogie con un'evoluzione esplosiva del tipo della selezione sessuale sia l'evoluzione culturale umana. La ragione è che anche qui la scelta per puro capriccio è importante, e una tale scelta può essere soggetta alla «moda» o all'effetto «la maggioranza vince sempre». Ancora una volta si dovrebbe ricordare l'avvertimento con cui ho aperto questo capitolo. L'«evoluzione» culturale non è in realtà affatto un'evoluzione se vogliamo essere pignoli e puristi sull'uso delle parole, ma fra le due cose potrebbero esserci abbastanza elementi in comune da giustificare una qualche comparazione dei loro principi, anche se non dobbiamo mai sottovalutare le differenze. Liquidiamo ora questi problemi prima di tornare al nostro argomento particolare delle spirali esplosive.

È stato spesso sottolineato - e in effetti anche uno sciocco può rendersene facilmente conto - che in molti aspetti della storia umana c'è qualcosa di simile all'evoluzione. Se si esamina un particolare aspetto della vita umana a intervalli regolari, per esempio se si considerano, a intervalli di un secolo, o forse di un decennio, lo stato della conoscenza scientifica, il tipo di musica, le mode nell'abbigliamento o i veicoli da trasporto, si troveranno delle tendenze. Se si hanno tre campioni, presi nei tempi successivi A, B e C, dire che c'è una tendenza significa dire che la misurazione presa nel tempo B sarà intermedia fra le misurazioni prese nei tempi A e C. Benché ci siano eccezioni, c'è un accordo generale sul fatto che tendenze di questo tipo caratterizzano molti aspetti della vita civilizzata. È vero che a volte si hanno inversioni di tendenza (per esempio nella lunghezza delle gonne), ma questo vale anche per l'evoluzione genetica.

Molte tendenze, in particolare quelle nella tecnologia utile in contrapposizione a mode frivole, possono essere identificate come miglioramenti senza che occorra fare molti ragionamenti sui giudizi di valore. Non può esserci alcun dubbio, per esempio, sul fatto che negli ultimi 200 anni i veicoli per compiere lunghi viaggi sono migliorati costantemente e senza alcuna inversione di tendenza, passando da veicoli a cavalli a veicoli a vapore, sino agli aereogetti supersonici di oggi. Io sto usando la parola miglioramento in modo neutro. Non intendo dire che tutti sarebbero d'accordo sulla tesi che, in conseguenza di questi mutamenti, la qualità della vita sia migliorata;

personalmente, io ho spesso dei dubbi in proposito. Né intendo negare l'opinione diffusa che la maestria nel lavoro sia diminuita quando la produzione di massa ha sostituito gli abili artigiani. Ma se si considerano i mezzi di trasporto esclusivamente dal punto di vista del trasporto - cosa che significa trasportare persone da una parte del mondo all'altra -, tralasciando ogni altra sorta di considerazioni, non si può disconoscere l'esistenza di una tendenza storica verso una qualche sorta di miglioramento, quand'anche non ci fosse stato altro che un semplice miglioramento nella velocità. Similmente, in una scala di tempo di decenni o addirittura di anni, c'è stato un innegabile miglioramento progressivo nella qualità delle apparecchiature ad alta fedeltà per l'amplificazione dei suoni, anche se qualche volta il lettore sarà d'accordo con me che il mondo sarebbe un posto più gradevole se l'amplificatore non fosse mai stato inventato. Non è che siano cambiati i gusti; è un fatto obiettivo, misurabile, che la fedeltà nella riproduzione dei suoni sia oggi migliore di quanto non fosse nel 1950, e che nel 1950 fosse decisamente migliore che nel 1920. La qualità della riproduzione di immagini è innegabilmente migliore nei televisori moderni che in quelli di qualche anno fa, anche se, ovviamente, non si può dare per scontato un analogo miglioramento nella qualità dei programmi trasmessi. La qualità delle macchine belliche presenta una tendenza vistosa al

miglioramento: al passare degli anni si rileva un loro vistoso progresso nell'efficienza e nella rapidità con cui uccidono persone. Il senso in cui tutto questo non è un miglioramento è troppo ovvio perché valga la pena di stare a spiegarlo dettagliatamente.

Non c'è dubbio che, in un senso tecnico ristretto, le cose migliorino costantemente al passare del tempo. Ma questo vale ovviamente solo per cose utili tecnicamente, come aeroplani e computer. Ci sono molti altri aspetti della vita umana che presentano vere tendenze senza che queste siano, in alcun senso ovvio, dei miglioramenti. Le lingue sono soggette a una chiara evoluzione, nel senso che manifestano tendenze e divergenze, e col passare dei secoli le divergenze finiscono col renderle sempre più inintelligibili fra loro. Le numerose isole del Pacifico forniscono un bel laboratorio per lo studio dell'evoluzione delle lingue. Le lingue delle varie isole sono chiaramente simili fra loro, e le loro differenze possono essere misurate con precisione sulla base del numero di parole diverse, una misura, questa, che è strettamente analoga alle misure tassonomiche molecolari di cui ci occuperemo nel capitolo X. La differenza fra le lingue, misurata dal numero delle parole divergenti, può essere rappresentata su un grafico in funzione della distanza fra le isole misurata in chilometri, e risulta che i punti segnati sul grafico si dispongono su una curva la cui precisa forma matematica ci dice qualcosa sulla rapidità di diffusione da un'isola all'altra. Le parole viaggiarono su canoa, passando da un'isola all'altra a intervalli di tempo proporzionali al grado di lontananza di ciascuna isola. All'interno di ogni isola le parole cambiano con un ritmo costante, in un modo molto simile a quello in cui mutano occasionalmente i geni. Ogni isola, se completamente isolata, presenterebbe al passare del tempo qualche mutamento evoluzionistico nella sua lingua rispetto alla lingua di altre isole. Le isole vicine hanno chiaramente un maggiore scambio di vocaboli, attraverso i contatti per mezzo di canoe, rispetto a isole più lontane fra loro. Le loro lingue hanno inoltre un antecedente comune più recente rispetto alle lingue di isole molto lontane fra loro. Questi fenomeni, che spiegano il tipo di somiglianze osservato fra isole vicine e lontane, sono strettamente analoghi ai fatti concernenti i «fringuelli» sulle varie isole delle Galapagos che ispirarono in origine Charles Darwin. I geni saltano da un'isola all'altra trasportati nel corpo di uccelli, esattamente come le parole sono trasportate su canoe.

Le lingue, quindi, si evolvono. Ma benché l'inglese moderno si sia evoluto dall'inglese di Chaucer, o l'italiano moderno dalla lingua di Dante e di Boccaccio, non penso che molte persone sarebbero disposte a sostenere che l'inglese moderno sia meglio di quello di Chaucer o l'italiano moderno meglio di quello di Dante e di Boccaccio. Quando parliamo di lingua, di norma non ci vengono in mente idee di miglioramento o di qualità; anzi, quando ci poniamo problemi di questo genere, di solito sentiamo il mutamento come deterioramento, come degenerazione. Noi tendiamo a vedere gli usi anteriori come corretti, e i mutamenti recenti come corruzioni. Riusciamo però ancora a scoprire tendenze che si possono considerare progressive in un senso puramente astratto, a prescindere da valori. E possiamo addirittura trovare fenomeni di retroazione positiva, sotto forma di accentuazioni (o, considerandoli da un altro punto di vista, di degenerazioni) di significato. Per esempio, la parola *star* («stella») fu usata per designare un attore o attrice del cinema di celebrità eccezionale.

Poi la parola degenerò gradualmente passando a significare un qualsiasi attore o attrice che interpretava uno dei ruoli principali di un film. Perciò, per recuperare il significato originario di eccezionale celebrità, la parola dovette essere accentuata: «superstar». In seguito la pubblicità degli studios cominciò a usare la parola «superstar» per attori che molte persone non avevano mai sentito nominare, cosicché si impose un ulteriore passaggio a «megastar». Oggi si sta facendo pubblicità ad alcune «megastar» che, almeno io, non ho mai sentito nominare, cosicché siamo forse alla vigilia di un'altra escalation. Sentiremo presto parlare di «iperstar»? Una retroazione positiva simile ha svalutato il valore della parola «chef». Essa deriva chiaramente dal francese *chef de cuisine* e significa capo della cucina. Questo è il significato dato nell'Oxford Dictionary. Per definizione, quindi, può esserci solo uno chef per cucina. Ma, forse per soddisfare la loro vanità, i cuochi (maschi) comuni, persino quelli che si limitano a preparare hamburger, cominciarono a chiamarsi chef. La conseguenza è che oggi, in inglese, si sente spesso l'espressione tautologica *head chef* (capo chef)!

Ma se questa è un'analogia per la selezione sessuale, lo è solo, nel caso migliore, in quello che io ho

chiamato il senso «debole». Vorrei ora saltare direttamente all'approccio più vicino che io riesca pensare a un'analogia «forte»: ossia al mondo dei dischi «pop». Se si assiste a una discussione fra appassionati di dischi pop o ci si sintonizza sui discorsi dei disc-jockey alla radio, si scoprirà una cosa in effetti molto curiosa. Mentre altri generi di critica d'arte tradiscono qualche preoccupazione per lo stile o il livello della prestazione, per lo stato d'animo, l'impatto emotivo, le qualità e le proprietà della forma d'arte, la subcultura della musica «pop» si preoccupa quasi esclusivamente della popolarità stessa. È del tutto chiaro che la cosa importante in un disco non è tanto la sua qualità quanto il livello delle vendite. L'intera subcultura è ossessionata dalle classifiche dei dischi, chiamate Top 20 o Top 40, che si fondano solo sui dati delle vendite. La cosa che conta veramente in un disco è in quale posizione si trovi nei Top 20. Questo, a rifletterci un po', è un fatto molto singolare, e anche molto interessante se pensiamo alla teoria dell'evoluzione sfrenata di R.A. Fisher. È probabilmente significativo anche il fatto che un disc-jockey menzioni di rado la posizione corrente di un disco nelle classifiche senza dirci al tempo stesso in che posizione si trovava la settimana prima. Questo fatto permette all'ascoltatore di stimare non solo la popolarità presente di un disco, ma anche l'entità e la direzione del mutamento nella sua popolarità.

Pare certo che molte persone comprano un disco per l'unica semplice ragione che molte altre persone lo stanno comprando, o che è probabile che lo comprino. Una prova sorprendente ci viene fornita dal fatto noto che le case discografiche inviano loro emissari in negozi chiave a comprare un gran numero dei loro dischi, per spingere le vendite nella regione in cui esse possono «decollare». (La cosa non è così difficile come potrebbe sembrare, poiché le cifre dei Top 20 si fondano sui rendiconti delle vendite in un piccolo campione di negozi di dischi. Sapendo quali siano questi negozi, è sufficiente comprare un gran numero di dischi in essi per esercitare un impatto significativo sulle stime delle vendite nell'intera nazione. Ci sono anche storie ben documentate di commessi di questi negozi che si sono fatti corrompere per fornire dati delle vendite adulterati.) In misura minore, lo stesso fenomeno dell'incidenza della popolarità sulle vendite è ben noto nel mercato librario, nel campo delle mode femminili e in generale nella pubblicità. Una delle cose migliori che un agente pubblicitario possa dire su un prodotto è che esso è il prodotto più venduto nel suo genere. Elenchi di best-seller vengono pubblicati ogni settimana, ed è senza dubbio vero che non appena un libro abbia venduto abbastanza copie da apparire in uno di questi elenchi le sue vendite aumenteranno ancora di più, semplicemente in virtù del fatto di essere fra i libri più venduti. Gli editori parlano del «decollo» di un libro, e quelli che hanno qualche conoscenza scientifica parlano persino di una «massa critica per il decollo». In quest'ultimo caso l'analogia è con una bomba atomica. L'uranio 235 è stabile finché non sia presente in quantità eccessiva in uno stesso posto. Esiste una massa critica che, una volta superata, permette l'instaurarsi di una reazione a catena o di un processo incontrollabile, con risultati devastanti. Una bomba atomica contiene due masse di uranio 235, ciascuna delle quali è più piccola della massa critica. Quando la bomba viene fatta detonare, le due masse vengono spinte l'una verso l'altra, la massa critica viene superata ed è la fine per una città di dimensioni medie. Quando le vendite di un libro raggiungono un «livello critico», le cifre toccano il punto in cui le raccomandazioni a viva voce ecc. fanno salire improvvisamente le sue vendite in modo incontrollato.

I ritmi di vendita diventano vistosamente maggiori di quanto non fossero prima che venisse raggiunta la massa critica, e potrebbe esserci un periodo di crescita esponenziale prima dell'inevitabile rallentamento e del successivo declino.

I fenomeni sottostanti non sono difficili da capire. Fondamentalmente abbiamo qui altri esempi di retroazione positiva.

Le qualità reali di un libro, o persino di un disco pop, non sono trascurabili nel determinare le vendite, ma nondimeno, ogni volta che sono in agguato fenomeni di retroazione positiva, ci sarà un forte elemento arbitrario nel determinare quale libro o quale disco avrà successo, e quale no. Se la massa critica e il decollo sono elementi importanti nella storia di ogni successo, ci sarà inevitabilmente una certa fortuna, e non manca certo lo spazio per la manipolazione e lo sfruttamento da parte di persone che capiscono il sistema. Val la pena, per esempio, di spendere una somma considerevole di denaro per promuovere un libro o un disco sino a fargli raggiungere il

«livello critico», giacché, una volta superato quel punto, non ci sarà più bisogno di spendere altro denaro per spingerlo: a quel punto subentreranno infatti fenomeni di retroazione positiva che ne promuoveranno efficacemente le vendite senza bisogno di altra pubblicità.

Questi fenomeni di retroazione positiva hanno qualcosa in comune con quelli della selezione sessuale secondo la teoria di Fisher-Lande, ma ci sono anche differenze. Le femmine di pavone che preferiscono i maschi dalla coda lunga sono favorite solo perché altre femmine hanno la stessa preferenza. Le qualità dei maschi stessi sono arbitrarie e non pertinenti. Sotto questo aspetto, l'entusiasta di dischi che vuole un disco particolare solo perché si trova nei Top 20 si comporta esattamente come la femmina del pavone. Ma i precisi meccanismi per mezzo dei quali la retroazione positiva lavora nei due casi sono diversi. E questo fatto, suppongo, ci riporta al punto da cui abbiamo preso l'avvio in questo capitolo, ossia all'ammonimento che le analogie dovrebbero essere spinte fino a un certo punto e non oltre.

IX

Puntualizzazione sul puntuazionismo

I figli di Israele, secondo la storia narrata nell'Esodo, impiegarono quarant'anni a migrare attraverso il deserto del Sinai sino alla Terra Promessa, ossia a percorrere una distanza di circa 320 chilometri. La loro velocità media fu quindi di quasi 22 metri al giorno, ossia di poco più di 90 centimetri all'ora, o di due metri e mezzo all'ora circa se si tiene conto delle soste notturne.

Comunque facciamo il calcolo, ci troviamo di fronte a una velocità media assurdamente piccola, molto minore di quella del proverbiale passo di lumaca (l'attuale record mondiale di velocità della lumaca, secondo il Guinness dei primati, è di ben 50,27 metri all'ora!). Ma nessuno, ovviamente, crede che i figli di Israele abbiano mantenuto in modo continuo e uniforme la velocità media. È chiaro che essi dovettero spesso alternare periodi di marcia a periodi di stasi, rimanendo sovente accampati a lungo in un luogo prima di rimettersi in movimento. Probabilmente molti di loro non avevano neppure un'idea molto chiara di stare viaggiando in una direzione particolarmente costante, e la loro migrazione, tutt'altro che regolare, li conduceva da un'oasi all'altra, al modo dei pastori nomadi del deserto. Nessuno, lo ripeto, crede che gli ebrei mantennero in modo continuo e uniforme la velocità media nel corso del loro lungo viaggio.

Supponiamo ora che entrino in scena due storici giovani ed eloquenti. La storia biblica, ci dicono, è stata finora dominata dalla scuola di pensiero «gradualistica». Gli storici «gradualistici», ci viene detto, credono letteralmente che gli ebrei abbiano percorso quasi 22 metri al giorno; essi piegavano le loro tende ogni mattina, percorrevano quasi 22 metri in direzione est-nordest e poi piantavano di nuovo le tende. L'unica alternativa al gradualismo, ci viene detto, è la nuova scuola storica dinamica, «puntuazionistica». Secondo i giovani puntuazionisti radicali, gli ebrei trascorsero la maggior parte del loro tempo in «stasi», non muovendosi affatto ma rimanendo accampati, spesso per anni, in un posto.

Poi riprendevano la marcia, piuttosto rapidamente, per fissare poco lontano un nuovo accampamento, dove facevano un'altra sosta per vari anni. Il loro procedere verso la Terra Promessa, anziché essere graduale e continuo, era a straton: lunghi periodi di stasi punteggiati da brevi periodi di rapido movimento. Inoltre i periodi di marcia non erano sempre nella direzione della Terra Promessa, bensì in direzioni quasi casuali. Solo quando noi osserviamo, a posteriori, il disegno macromigratorio su vasta scala, possiamo riscontrare una tendenza nella direzione della Terra Promessa.

L'eloquenza degli storici biblici puntuazionisti è tanto grande che essi hanno fatto sensazione sui mezzi di comunicazione di massa. I loro ritratti compaiono sulla copertina di settimanali di grande tiratura. Nessun documentario televisivo sulla storia biblica è completo senza un'intervista ad almeno uno fra i principali puntuazionisti. Persone che non sanno nient'altro di esegesi biblica ricordano solo un fatto: nei giorni bui prima che venissero in scena i puntuazionisti ogni altro studioso aveva idee sbagliate sull'argomento. Si osservi che la fama dei puntuazionisti non ha niente

a che vedere col fatto che essi possono aver ragione. Essa ha invece tutto a che vedere con la tesi che gli autori precedenti erano «gradualisti» e sbagliavano. Il successo dei puntuazionisti è dovuto al fatto che essi si spacciano come rivoluzionari che hanno un grande ascolto presso il pubblico, non al fatto di avere ragione.

La mia esposizione sugli storici biblici puntuazionisti non è, ovviamente, vera. Essa è solo una parabola su un'analoga presunta controversia fra gli studiosi dell'evoluzione biologica. Sotto alcuni aspetti è una parabola sbagliata, ma non del tutto, e ha in sé una verità sufficiente da giustificare la sua collocazione all'inizio di questo capitolo. Fra i biologi evoluzionisti c'è una scuola di pensiero molto pubblicizzata, i cui proponenti si chiamano puntuazionisti, e fu nell'ambito di questa scuola che fu inventato il termine «gradualisti» per designare i loro predecessori più influenti. I puntuazionisti hanno goduto di una pubblicità enorme fra un pubblico che non sa quasi nient'altro sull'evoluzione, e questo perché la loro posizione è stata presentata, da fonti secondarie più che da se stessi, come radicalmente diversa dalle posizioni degli evoluzionisti anteriori, e specialmente da quella di Charles Darwin. Fino a questo punto la mia analogia con la storia biblica è abbastanza appropriata.

Il punto di vista sotto cui l'analogia è sbagliata è che, nella storia dell'esegesi biblica, i «gradualisti» erano ovviamente uomini di paglia inesistenti, fabbricati dai puntuazionisti. Nel caso degli evoluzionisti «gradualisti», il fatto che essi siano uomini di paglia inesistenti non è altrettanto ovvio, ma dev'essere dimostrato.

È possibile interpretare le parole di Darwin e di molti altri evoluzionisti come ispirate da un intento gradualistico, ma poi diventa importante rendersi conto che la parola «gradualista» può essere interpretata in modi diversi a significare cose diverse. In effetti, io svilupperò un'interpretazione della parola «gradualista» in accordo alla quale quasi tutti sono gradualisti. Nel caso dell'evoluzione, diversamente che nella parabola dei figli di Israele, è latente una controversia genuina, la quale concerne però particolari minori, che non hanno mai un'importanza tale da giustificare l'interesse dei mezzi di comunicazione di massa.

Fra gli evoluzionisti, i «puntuazionisti» uscirono in origine dai ranghi della paleontologia. La paleontologia è lo studio dei fossili. Essa è una branca molto importante della biologia, poiché i progenitori degli organismi viventi si sono estinti tutti molto tempo fa, e i fossili ci forniscono l'unica documentazione diretta di animali e piante di un lontano passato. Se vogliamo sapere quale aspetto avessero i nostri lontani progenitori, i fossili sono la nostra speranza principale. Non appena ci si rese conto di che cosa fossero veramente i fossili - scuole di pensiero precedenti avevano ritenuto che fossero creazioni del demonio, o videro in essi le ossa di miseri peccatori annegati nelle acque del diluvio -, divenne chiaro che ogni teoria dell'evoluzione doveva avere certe attese sulla documentazione fossile. Ci sono state però delle controversie nel definire esattamente quali dovessero essere tali attese, e le tesi dei puntuazionisti riguardano in parte proprio questo punto. Noi siamo fortunati a poter disporre di fossili. È una fortuna che ossa, conchiglie e altre parti dure di animali, prima di corrompersi, possano a volte lasciare un'impronta che in seguito agisce come uno stampo, plasmando la roccia che va indurendosi in un ricordo permanente dell'animale. Noi non sappiamo quale sia la proporzione degli animali che si fossilizzano dopo la loro morte - io personalmente considererei un onore fossilizzarmi - ma essa è senza dubbio molto piccola. Ma per quanto piccola essa sia, ci sono certe cose che ogni evoluzionista dovrebbe attendersi di vedere documentate dai fossili. Noi saremmo molto sorpresi, per esempio, se trovassimo dei fossili umani apparire prima dell'epoca a cui datiamo l'evoluzione dei mammiferi! Se si dovesse trovare un singolo cranio di mammifero in rocce dell'età di 500 milioni di anni, la nostra moderna teoria dell'evoluzione ne uscirebbe distrutta. Per inciso, questa è una risposta sufficiente alla tesi truffaldina, diffusa dai creazionisti e dai giornalisti loro compari, che l'intera teoria dell'evoluzione sia una tautologia «non falsificabile». Per una curiosa ironia questa è anche la ragione per cui i creazionisti insistono con tanta pervicacia sull'autenticità delle false impronte umane, scavate in realtà nel periodo della Depressione per ingannare i turisti, nei giacimenti di ossa di dinosauro nel Texas.

In ogni caso, se disponiamo in ordine cronologico i nostri fossili genuini, dai più antichi ai più

moderni, la teoria dell'evoluzione si attende di vedere una qualche sorta di sequenza ordinata, e non un'accozzaglia senza capo né coda. Inoltre - cosa più interessante ai fini dell'argomento di questo capitolo - le varie versioni della teoria dell'evoluzione, per esempio il gradualismo e il «puntuazionismo», potrebbero attendersi di trovare tipi diversi di distribuzione dei fossili. Tali attese possono essere verificate solo se noi possediamo qualche mezzo per datare i fossili, o almeno per conoscere l'ordine in cui furono deposti. I problemi della datazione dei fossili, e le soluzioni di questi problemi, richiedono una breve digressione, la prima di varie digressioni per le quali chiedo in anticipo l'indulgenza del lettore.

Esse sono necessarie per la spiegazione del tema principale del capitolo.

Noi abbiamo imparato da molto tempo a disporre i fossili nello stesso ordine in cui erano deposti. Il metodo è implicito nell'espressione stessa «erano deposti». I fossili più recenti vengono ovviamente deposti sopra fossili anteriori e non sotto di essi, e perciò si trovano sopra di essi nella stratificazione geologica. Di tanto in tanto può accadere che fenomeni sismici sconvolgano le rocce, capovolgendone addirittura qualche tratto; in tali casi l'ordine in cui i fossili compaiono nei nostri scavi può essere addirittura rovesciato; ma questo è un fenomeno così raro da apparire subito evidente quando si presenta. Anche se solo di rado, scavando nelle rocce di un'area qualsiasi, troviamo una documentazione storica completa, possiamo spesso ricostruire una documentazione soddisfacente componendo porzioni che presentino parziali sovrapposizioni in aree diverse (in realtà, benché io abbia parlato di scavi, accade di rado che i paleontologi scavino direttamente nella roccia strato dopo strato; molto più spesso essi trovano i fossili esposti dall'erosione a varie profondità). Già molto tempo prima di imparare come datare i fossili in milioni di anni, i paleontologi avevano elaborato uno schema attendibile delle ere geologiche, e conoscevano con grande abbondanza di particolari la sequenza delle varie ere.

Certi tipi di conchiglie sono così attendibili nel fornirci informazioni sull'età delle varie rocce da essere fra i principali indicatori usati nella prospezione petrolifera. Di per se stessi, però, essi possono dirci qualcosa solo sull'età relativa dei vari strati rocciosi, mai sulla loro età assoluta. Più recentemente, progressi compiuti in fisica ci hanno fornito metodi per assegnare età assolute, in milioni di anni, a rocce e ai fossili che esse contengono. Questi metodi dipendono dal fatto che particolari elementi radioattivi decadono entro periodi che conosciamo con precisione. È un po' come se cronometri di precisione in miniatura fossero stati opportunamente sepolti nelle rocce. Ogni cronometro fu messo in funzione nel momento stesso in cui fu deposto nella roccia. Tutto ciò che i paleontologi devono fare è di riportarlo in luce e leggere l'ora sul quadrante. I diversi tipi di cronometri geologici fondati sul decadimento radioattivo hanno una diversa velocità di funzionamento. Il cronometro al radiocarbonio funziona con grande rapidità e il suo ticchettio è così veloce che, dopo qualche migliaio di anni, la sua molla ha quasi perduto la carica e l'orologio non è più attendibile. Esso è molto utile per datare materiali organici alla scala di tempo archeologico-storica, in cui si misurano durate di centinaia o di qualche migliaio di anni, ma non è di alcuna utilità per la scala di tempo dell'evoluzione, in cui si ha a che fare con milioni di anni.

Per la scala di tempo dell'evoluzione sono utili altri tipi di orologio, come quello al potassio-argo. L'orologio al potassio-argo è così lento che non sarebbe di alcuna utilità per la scala di tempo archeologico-storica. Sarebbe come tentare di usare la lancetta delle ore su un orologio comune per cronometrare il tempo di un atleta nei cento metri. Per prendere i tempi di quella megamaratona che è l'evoluzione, d'altra parte, un orologio come quello al potassio-argo era proprio quel che ci voleva. Altri «cronometri» radioattivi, ciascuno col suo proprio ambito di utilità, sono quello al rubidio-stronzio e quello all'uranio-torio.

Questa digressione ci ha detto dunque che, se a un paleontologo viene presentato un fossile, egli è di solito in grado di dire quando l'animale sia vissuto su una scala assoluta di milioni di anni.

Noi abbiamo affrontato questa discussione della datazione e della misura del tempo, come il lettore ricorderà, perché eravamo interessati alle attese sulla documentazione fossile che i vari tipi di teoria evoluzionistica - «puntuazionistica», «gradualistica» ecc. - dovrebbero avere. È venuto ora il momento di discutere quali dovrebbero essere tali attese.

Supponiamo, innanzitutto, che la natura fosse stata straordinariamente gentile con i paleontologi (o

forse scortese, se si pensa al lavoro in più che questo fatto comporterebbe) e avesse dato loro un fossile di ogni animale vissuto nell'intera storia della vita sulla Terra. Se noi potessimo dare un'occhiata a una tale documentazione fossile completa, organizzata con cura in ordine cronologico, che cosa dovremmo attenderci di vedere come evoluzionisti? Se fossimo «gradualisti», nel senso messo in caricatura nella parabola degli ebrei, dovremmo attenderci qualcosa di simile al quadro seguente. Le sequenze cronologiche di fossili presenteranno sempre tendenze evolutive uniformi con tassi di mutamento fissi. In altri termini, se abbiamo tre fossili, A, B e C, di cui A è un progenitore di B, che è a sua volta un progenitore di C, dovremmo attenderci che B avesse una forma proporzionatamente intermedia fra A e C. Per esempio, se A avesse le zampe lunghe 50 centimetri e C avesse le zampe lunghe un metro, le zampe di B dovrebbero avere una lunghezza intermedia, e la loro lunghezza esatta dovrebbe essere proporzionale al tempo trascorso fra l'esistenza di A e quella di B.

Se portiamo la caricatura del gradualismo alla sua conclusione logica, possiamo calcolare la velocità media dell'allungamento delle zampe nella linea evolutiva che condusse da A a C nello stesso modo in cui abbiamo calcolato la velocità media degli ebrei a quasi 22 metri al giorno. Se, per esempio, A fosse vissuto 20 milioni di anni prima di C (per trovare un vago riscontro con la realtà, il membro più antico che si conosca della famiglia del cavallo, l'*Hyracotherium*, visse circa 50 milioni di anni fa, e aveva la mole di un terrier), avremmo una velocità di crescita evolutiva delle zampe di mezzo metro ogni 20 milioni di anni, ossia di 2,5 milionesimi di centimetro all'anno. Ora, il gradualismo caricaturale dovrebbe credere che le zampe crescano costantemente, nel corso delle generazioni, a questo ritmo lentissimo: diciamo a 10 milionesimi di centimetro per ogni generazione, se poniamo pari a quattro anni la durata di una generazione in animali simili ai cavalli. Il gradualista dovrebbe credere che, per tutti quei milioni di generazioni, gli individui con zampe lunghe 10 milionesimi di centimetro più della media godessero di un vantaggio significativo nella lotta per la sopravvivenza rispetto agli individui con zampe di lunghezza media. Credere una cosa del genere è come credere che gli ebrei percorressero ogni giorno ventidue metri nel deserto.

Lo stesso vale anche per uno dei mutamenti evoluzionistici più rapidi che si conoscano, lo sviluppo del cranio umano da un progenitore simile all'australopiteco, con un volume encefalico di circa 500 centimetri cubici, al moderno *Homo sapiens*, il cui volume encefalico medio si aggira attorno a 1400 cc. Questo aumento di circa 900 cc, che rappresenta quasi una triplicazione del volume del cervello, si è realizzato in non più di tre milioni di anni. Alla scala di tempo dell'evoluzione, questo è un ritmo di mutamento molto rapido: il cervello sembra gonfiarsi come un pallone e in effetti, visto da certi angoli, il cranio umano moderno assomiglia effettivamente a una palla sferica, di contro al cranio più piatto, dalla fronte sfuggente, dell'*Australopithecus*.

Se però contiamo il numero delle generazioni contenute in tre milioni di anni (diciamo circa quattro per secolo), il ritmo medio dell'evoluzione risulta essere di meno di un centesimo di centimetro cubico per generazione.

Un gradualista caricaturale dovrebbe credere che ci sia stato un mutamento lento e inesorabile da una generazione all'altra, tale che in ogni generazione i figli avevano un cervello leggermente più grosso, di 0,01 cc, rispetto ai loro padri. E inoltre che il centesimo di centimetro cubico in più fornisse a ogni generazione successiva un vantaggio significativo ai fini della sopravvivenza rispetto alla generazione precedente.

Ma un centesimo di centimetro cubico è una quantità minuscola rispetto alla varietà di dimensioni craniche che troviamo fra gli esseri umani moderni. È un fatto spesso citato, per esempio, che lo scrittore Anatole France - che non era uno sciocco, e che vinse un premio Nobel - aveva una capacità cranica di meno di 1000 cc, mentre all'altro estremo dello spettro si conoscono cervelli di 2000 cc: come esempio si cita spesso Oliver Cromwell, anche se non so con quale attendibilità. L'incremento medio per generazione di 0,01 cc, che secondo il gradualista caricaturale dovrebbe garantire un vantaggio significativo per la sopravvivenza, è quindi solo un centomillesimo della differenza esistente fra il cervello di Anatole France e quello di Oliver Cromwell!

È una fortuna che il gradualista caricaturale non esista in realtà.

Ma se questo tipo di gradualista è una caricatura inesistente - un semplice mulino a vento per la

lancia dei puntuazionisti c'è un qualche altro tipo di gradualista che esista realmente e che abbia convinzioni difendibili? Mostrerò che la risposta è affermativa, e che i ranghi dei gradualisti, in questo secondo senso, comprendono tutti gli evoluzionisti ragionevoli, fra cui, se si considerano con attenzione le loro convinzioni, anche coloro che chiamano se stessi puntuazionisti. Ma dobbiamo sforzarci di capire perché i puntuazionisti abbiano pensato che le loro opinioni fossero tanto rivoluzionarie ed eccitanti. Il punto di partenza per discutere questi argomenti è l'apparente esistenza di «lacune» nella documentazione fossile, e ora ci volgeremo proprio a considerare queste lacune.

Da Darwin in poi gli evoluzionisti si sono resi conto che, se noi disponiamo tutti i fossili in nostro possesso in ordine cronologico, essi non formano una sequenza uniforme di mutamento appena avvertibile. Noi possiamo, senza dubbio, discernere tendenze di mutamento a lungo termine - zampe progressivamente più lunghe, crani progressivamente più tondeggianti e via dicendo ma le tendenze percepibili nella documentazione fossile sono di solito irregolari, non uniformi. Darwin, e la maggior parte dei suoi seguaci, supposero che questo fatto fosse dovuto principalmente all'incompletezza della documentazione fossile. Secondo Darwin una documentazione fossile completa, se mai potessimo averla, ci mostrerebbe effettivamente un mutamento graduale, e non a scossoni. Ma poiché la fossilizzazione è un processo dominato in gran parte dal caso, e il ritrovamento dei fossili esistenti è non meno casuale, è un po' come se noi possedessimo la pellicola di un film dalla quale mancassero la maggior parte dei fotogrammi. Quando proiettiamo il film della nostra documentazione fossile, possiamo vedere senza dubbio un qualche tipo di movimento, ma è un movimento più a scatti di quello di Charlie Chaplin, poiché neppure le più vecchie e malconce pellicole di Chaplin hanno perduto nove fotogrammi su dieci.

I paleontologi americani Niles Eldredge e Stephen Jay Gould, quando proposero per la prima volta, nel 1972, la loro teoria degli equilibri punteggiati, diedero quello che, dopo di allora, è stato presentato come un suggerimento molto diverso. Essi avanzarono l'ipotesi che la documentazione fossile potrebbe non essere, in realtà, così incompleta come si riteneva. Forse le «lacune» potevano essere un riflesso fedele di ciò che era accaduto anziché le conseguenze sgradevoli ma inevitabili di una documentazione fossile imperfetta. Forse, suggerirono, l'evoluzione era proceduta realmente a scossoni improvvisi, intervallati a lunghi periodi di «stasi», durante i quali in una linea genealogica data non si verificava alcun mutamento.

Prima di passare a considerare quale sorta di scossoni improvvisi essi avessero in mente, è il caso di rilevare che ci sono alcuni significati concepibili di «scossoni improvvisi» che essi di sicuro non avevano in mente. Questi punti devono essere chiariti perché sono stati oggetto di gravi fraintendimenti. Eldredge e Gould sarebbero certamente d'accordo sulla tesi che alcune lacune molto importanti si devono senza dubbio a imperfezioni nella documentazione fossile. Anche lacune molto grandi. Per esempio, gli strati geologici del Cambriano, databili a circa 600 milioni di anni fa, sono i più vecchi in cui possiamo trovare la maggior parte dei principali gruppi di invertebrati. E ne troviamo molti già in uno stato di evoluzione avanzato la primissima volta che compaiono fra i fossili. È un po' come se fossero apparsi d'improvviso, senza alcuna storia evoluzionistica.

Non occorre dire che questo fatto ha deliziato i creazionisti. Gli evoluzionisti di ogni specie credono però che questa sia davvero una grande lacuna nella documentazione fossile, una lacuna dovuta al fatto che, per qualche ragione, si sono conservati pochissimi fossili di periodi anteriori a 600 milioni di anni fa. Una buona ragione potrebbe essere che il corpo di molti di questi animali aveva solo parti molli: niente conchiglia o ossa suscettibili di fossilizzarsi. Un creazionista potrebbe pensare che questa sia un'argomentazione speciosa. Io qui sto sostenendo che, quando parliamo di lacune di questa grandezza, non c'è alcuna differenza di interpretazione fra «puntuazionisti» e «gradualisti». Entrambe le scuole di pensiero nutrono un eguale disprezzo verso i cosiddetti creazionisti scientifici, ed entrambe concordano sulla tesi che le lacune più grandi sono reali, che sono vere imperfezioni nella documentazione fossile. Entrambe le scuole di pensiero concordano inoltre sulla tesi che l'unica spiegazione alternativa dell'improvvisa apparizione di un così gran numero di tipi animali complessi nel Cambriano potrebbe essere la creazione divina, ed entrambe rifiutano

decisamente questa alternativa.

C'è un altro senso concepibile in cui si potrebbe dire che l'evoluzione procede per sobbalzi improvvisi, un senso che non è quello proposto da Eldredge e Gould, almeno nella maggior parte dei loro scritti. È concepibile che alcune fra le «lacune» apparenti nella documentazione fossile riflettano veramente un mutamento improvviso in una singola generazione. È concepibile che non ci sia mai stata veramente alcuna forma intermedia, e che grandi mutamenti evoluzionistici abbiano avuto luogo in una singola generazione. Un figlio potrebbe essere nato così diverso da suo padre da appartenere propriamente a una nuova specie. Egli sarebbe un individuo mutante, e la mutazione sarebbe così grande che noi dovremmo chiamarla una macromutazione. Le teorie dell'evoluzione che dipendono da macromutazioni sono dette teorie «saltazioniste», dal latino saltus (salto). Poiché la teoria degli equilibri punteggiati, o puntuati, viene spesso confusa con le vere macromutazioni, è importante discutere qui le macromutazioni e mostrare perché esse non possano essere un fattore significativo nell'evoluzione.

Macromutazioni - mutazioni che esercitano grandi effetti esistono senza dubbio. Quel che è in discussione non è se esistano ma se svolgano un ruolo nell'evoluzione; se, in altri termini, vengano incluse nel pool genico di una specie o se, al contrario, vengano invariabilmente eliminate dalla selezione naturale. Un famoso esempio di macromutazione è l'«antennapedia» nella *Drosophila*. In un individuo normale le antenne hanno qualcosa in comune con le zampe, e si sviluppano nell'embrione in modo simile. Ma anche le differenze sono molto vistose e i due tipi di appendici vengono usati per fini molto diversi: le zampe per camminare, le antenne per la percezione tattile, per l'olfatto e per altri compiti connessi alla percezione. Le drosofile affette da antennapedia sono capricci della natura in cui le antenne si sviluppano esattamente come le zampe. O, per esprimerci in modo diverso, sono drosofile che, in luogo delle antenne, hanno un paio di zampe extra, cresciute nella stessa posizione in cui dovrebbero trovarsi le antenne. Questa è una vera mutazione, risultando da un errore nella copiatura del dna, e si trasmette alla prole se le drosofile affette da questa malformazione vengono curate nell'ambiente protetto del laboratorio in modo da sopravvivere abbastanza a lungo da riprodursi. In natura esse non sopravviverebbero molto a lungo, poiché i loro movimenti sono goffi e i loro sensi vitali menomati.

Le macromutazioni, quindi, si verificano veramente. Ma svolgono un ruolo nell'evoluzione? I macroevoluzionisti (o saltazionisti) ritengono che le macromutazioni siano un mezzo in virtù del quale grandi salti nell'evoluzione potrebbero aver luogo nell'arco di una singola generazione. Richard Goldschmidt, che abbiamo già incontrato nel capitolo III, fu un vero macroevoluzionista. Se il saltazionismo fosse vero, le «lacune» apparenti nella documentazione fossile potrebbero non essere vere lacune. Per esempio, un saltazionista potrebbe credere che la transizione dall'australopiteco, dalla fronte sfuggente, all'*Homo sapiens*, dalla fronte alta e tondeggiante, abbia avuto luogo in virtù di una singola macromutazione, in una sola generazione. La differenza di forma fra le due specie è probabilmente inferiore alla differenza fra una drosofila normale e una drosofila antennapeditica, ed è teoricamente concepibile che il primo *Homo sapiens* sia stato un figlio «strano» - probabilmente respinto e perseguitato - di due genitori normali appartenenti alla specie *Australopithecus*.

Ci sono ottime ragioni per rifiutare tutte le teorie saltazionistiche dell'evoluzione. Una ragione piuttosto banale è che, se una nuova specie potesse avere veramente origine da una singola mutazione, i membri della nuova specie potrebbero avere difficoltà a trovare i propri partner sessuali. Io considero però questa ragione meno efficace e interessante delle altre due che sono già state prospettate quando abbiamo esaminato perché si debbano escludere grandi salti attraverso il Paese dei Biomorfi. La prima di queste ragioni fu esposta dal grande statistico e biologo R.A. Fisher, che abbiamo incontrato in capitoli precedenti in altri contesti. Fisher fu un deciso oppositore di ogni forma di macroevoluzione, in un periodo in cui il saltazionismo era più di moda di quanto non sia oggi, e usò la seguente analogia. Pensiamo, egli scrisse, a un microscopio che sia quasi, ma non del tutto, perfettamente a fuoco e altrimenti ben regolato per una visione nitida. Quali probabilità ci sono che, apportando allo stato del microscopio qualche mutamento a caso (corrispondente a una mutazione), miglioriamo la messa a fuoco e la qualità generale

dell'immagine? Fisher scrisse: È abbastanza ovvio che qualsiasi intervento di grandi proporzioni avrà ben poche probabilità di migliorare la regolazione, mentre nel caso di alterazioni molto minori di quelle più piccole di quelle che vengono apportate intenzionalmente dal costruttore o dall'operatore la probabilità di un miglioramento dovrebbe essere quasi esattamente del 50 per cento.

Ho già osservato che quel che sembrava a Fisher «facile vedere» potrebbe porre richieste difficilissime al vigore mentale di scienziati comuni, e lo stesso vale anche per ciò che Fisher definisce «abbastanza ovvio». Nondimeno, ulteriori riflessioni dimostrano quasi sempre che egli aveva ragione, e in questo caso possiamo dimostrarlo con nostra soddisfazione senza eccessiva difficoltà. Ricordiamo che stiamo supponendo che il microscopio sia quasi perfettamente a fuoco prima che diamo inizio ai nostri interventi. Supponiamo che l'obiettivo sia troppo in basso, ossia troppo vicino di un millimetro al vetrino, perché lo strumento possa essere perfettamente a fuoco. Ora, se spostiamo l'obiettivo di un intervallo piccolissimo, diciamo di un decimo di millimetro, in una direzione casuale, quali saranno le probabilità che la messa a fuoco migliori? Se lo abbassiamo verso il vetrino di un decimo di millimetro, la messa a fuoco peggiorerà, mentre migliorerà se lo alziamo di un decimo di millimetro. Poiché stiamo intervenendo a caso, la probabilità per ciascuna di queste evenienze è un mezzo, ossia 50 per cento.

Quanto più piccolo è il movimento di regolazione, in relazione all'errore iniziale, tanto più la probabilità di miglioramento si avvicinerà a un mezzo. Questa conclusione completa la giustificazione della seconda parte dell'affermazione di Fisher.

Supponiamo ora di spostare l'obiettivo del microscopio di una grande distanza - equivalente a una macromutazione -, anche questa volta in una direzione casuale; supponiamo per esempio di muoverlo di un centimetro. Ora, non importa in quale direzione operiamo questo movimento, in alto o in basso, il risultato sarà comunque quello di peggiorare la messa a fuoco rispetto a quella che era prima. Se ci capita di spostare l'obiettivo verso il basso, esso si troverà a undici millimetri dalla sua posizione ideale (e sarà andato probabilmente a frantumare il vetrino). Se ci capita invece di spostarlo verso l'alto, esso si troverà ora a nove millimetri dalla sua posizione ideale. Prima dei nostri interventi, esso si trovava a un solo millimetro dalla sua posizione ideale, cosicché, in un modo come nell'altro, la nostra «macromutazione» ha avuto effetto dannoso. Abbiamo fatto il calcolo per una mossa grandissima («macromutazione») e per una mossa piccolissima («micromutazione»). Potremmo fare ovviamente lo stesso calcolo per una varietà di mosse di grandezza intermedia, ma non caveremmo nulla di utile. Io penso che in realtà sia ora abbastanza ovvio che, quanto più piccolo sarà il nostro intervento, tanto più ci avvicineremo al caso estremo in cui le probabilità di un miglioramento saranno del 50 per cento; e quanto più grande sarà il nostro intervento, tanto più ci avvicineremo all'altro estremo, in cui le probabilità di un miglioramento saranno zero.

Questo ragionamento, come il lettore avrà notato, dipende dall'assunto iniziale che, prima che noi cominciassimo i nostri tentativi casuali di messa a punto, il microscopio era già abbastanza vicino a una messa a fuoco perfetta. Se inizialmente l'obiettivo del microscopio è lontano 2 centimetri dalla posizione corrispondente alla messa a fuoco, un mutamento casuale di 1 centimetro avrà un 50 per cento di probabilità di essere un miglioramento, esattamente come un mutamento casuale di un centesimo di centimetro. In questo caso la «macromutazione» sembra presentare il vantaggio di muovere più rapidamente l'obiettivo verso una messa a fuoco ottimale. Il ragionamento di Fisher sul carattere dannoso delle macromutazioni si applicherà qui a «megamutazioni» costituite, per esempio, da un movimento di 6 centimetri in una direzione casuale.

Perché, allora, Fisher poté fare il suo assunto iniziale che il microscopio fosse quasi a fuoco?

L'assunto deriva dal ruolo svolto nell'analogia dal microscopio. Il microscopio dopo il tentativo di regolazione casuale sta per un animale mutante. Il microscopio prima del tentativo di messa a fuoco casuale sta per il genitore normale, non mutante, del presunto animale mutante.

Essendo un genitore, dev'essere sopravvissuto abbastanza a lungo per riprodursi, e perciò non può che essere abbastanza vicino a una buona messa a punto. Per la stessa ragione, il microscopio prima dell'intervento casuale non può essere molto lontano da una buona messa a fuoco, giacché in caso

contrario l'animale da esso rappresentato nell'analogia non avrebbe potuto sopravvivere. Questa è solo un'analogia, e non ha senso stare a discutere se l'«abbastanza vicino» significhi un centimetro o un decimo di centimetro o un millesimo di centimetro. Il punto importante è che, se noi consideriamo mutazioni di grandezza sempre crescente, verrà un punto in cui, quanto più grande è la mutazione, tanto meno probabile è che essa sia benefica; mentre, se consideriamo mutazioni di grandezza sempre decrescente, verrà un momento in cui la probabilità che una mutazione sia benefica sarà del 50 per cento.

Il ragionamento sul problema se macromutazioni come l'antennapedia possano mai essere benefiche (o almeno se si possa evitare che siano dannose) e se possano quindi dare origine al mutamento evolutivo ruota dunque attorno al problema di quanto sia «macro» la mutazione che stiamo considerando.

Quanto più «macro» essa è, tanto più probabile è che sia deleteria, e tanto meno probabile che venga incorporata nell'evoluzione di una specie. In effetti, praticamente tutte le mutazioni studiate nei laboratori di genetica - le quali sono abbastanza macro, altrimenti i genetisti non le rileverebbero - sono deleterie agli animali che le posseggono (per una curiosa ironia, ho conosciuto persone le quali pensano che questo sia un argomento contro il darwinismo!). L'argomento del microscopio di Fisher fornisce quindi una ragione allo scetticismo verso le teorie saltazionistiche, almeno nella loro forma estrema.

Anche l'altra ragione generale per non credere al saltazionismo è una ragione statistica, e anche la sua forza dipende in modo quantitativo da quanto sia macro la macromutazione che stiamo postulando. In questo caso il problema in gioco è quello della complessità dei mutamenti evolutivi. Molti, anche se non la totalità, dei mutamenti evolutivi cui siamo interessati sono progressi nella complessità del progetto. L'esempio estremo dell'occhio, di cui ci siamo occupati nei capitoli precedenti, ben chiarisce questo punto. Gli animali con occhi come i nostri si sono evoluti da progenitori senza occhi. Un macroevoluzionista estremo potrebbe postulare che quest'evoluzione abbia avuto luogo per mezzo di una singola mutazione. Un animale che non aveva occhi, ma solo della nuda pelle là dove in seguito si sarebbero sviluppati gli occhi, ebbe un figlio «strano» con occhi completamente sviluppati, completi di cristallino a fuoco variabile, di diaframma dell'iride per variare la quantità di luce in ingresso, di una retina con milioni di fotocellule sensibili a tre colori, il tutto correttamente connesso per mezzo di nervi al cervello per fornirgli una corretta visione stereoscopica binoculare a colori.

Nel modello dei biomorfi abbiamo supposto che questo tipo di miglioramento pluridimensionale non possa avere luogo. Per produrre un occhio dal nulla non occorre infatti solo un miglioramento, bensì un gran numero di miglioramenti. Ciascuno di questi miglioramenti è alquanto improbabile di per sé, ma non così improbabile da risultare impossibile. Quanto maggiore è il numero dei miglioramenti simultanei che consideriamo, tanto più improbabile è però che essi possano verificarsi simultaneamente. La coincidenza di una loro occorrenza simultanea ha un grado di improbabilità pari a quello di saltare a una grande distanza attraverso il Paese dei Biomorfi, arrivando in un punto particolare prestabilito. Se decidessimo di considerare un numero di miglioramenti abbastanza grande, la loro occorrenza simultanea diventerebbe tanto improbabile da risultare, a ogni buon conto, impossibile. Ci siamo soffermati già abbastanza a lungo su questo argomento, ma potrebbe essere utile tracciare una distinzione fra due tipi di macromutazione ipotetica, i quali sembrerebbero esclusi entrambi dall'argomento della complessità mentre in realtà solo uno di essi ne è di fatto escluso. Io li chiamerò, per ragioni che diventeranno subito chiare, macromutazioni Boeing 747 e macromutazioni dc8 allungato.

Le macromutazioni Boeing 747 sono le uniche realmente escluse dall'argomento della complessità appena citato. Esse prendono il nome dal memorabile fraintendimento della teoria della selezione naturale da parte dell'astronomo Fred Hoyle.

Questi paragonò la selezione naturale, nella sua presunta improbabilità, a un uragano che soffiasse in un cantiere di demolizioni e rimontasse per caso un Boeing 747. Come abbiamo visto nel capitolo I, questa è un'analogia del tutto falsa con la selezione naturale, mentre è un'analogia molto buona con l'idea che certi tipi di macromutazioni possano dare origine al mutamento

evoluzionistico. In effetti l'errore fondamentale di Hoyle fu quello di pensare (senza rendersene conto) che la teoria della selezione naturale dipendesse da macromutazioni. L'idea che una singola macromutazione dia origine a un occhio pienamente funzionante, con le proprietà elencate sopra, là dove in precedenza c'era solo una chiazza di pelle nuda, è in effetti altrettanto improbabile quanto quella che un uragano monti un Boeing 747. Ecco perché designo questa sorta di macromutazione ipotetica col nome di macromutazione Boeing 747.

Le macromutazioni dc8 allungato sono mutazioni che, pur potendo essere grandi nell'entità dei loro effetti, risultano non essere grandi nei termini della loro complessità. Il dc8 allungato è un aereo di linea che fu costruito modificando un aereo di linea precedente, il dc8. È simile a un dc8, ma con la fusoliera allungata. Rappresentò un miglioramento almeno da un punto di vista, nel senso che poteva trasportare un numero di passeggeri superiore rispetto al dc8 originale. L'allungamento in questione è un grande accrescimento in lunghezza, e in questo senso è analogo a una macromutazione. Fatto più interessante, l'aumento in lunghezza è, a prima vista, un mutamento complesso.

Per allungare la fusoliera di un aereo di linea non è sufficiente aggiungere un tratto di cabina, ma si devono allungare innumerevoli condotti, fili, tubi dell'aria e cavi elettrici. Si deve montare un numero molto maggiore di sedili, di portacenere, di lampade per la lettura, di selettori di musica a dodici canali e di prese d'aria. A prima vista parrebbe che in un dc8 allungato ci fosse molta più complessità, ma è davvero così? La risposta è no, almeno nella misura in cui le cose «nuove» nell'aereo allungato sono solo un «maggior numero delle cose vecchie». I biomorfi del capitolo III presentano spesso macromutazioni della varietà dc8 allungato.

Che cosa ha a che fare tutto questo con le mutazioni che si verificano negli animali reali? La risposta è che alcune mutazioni reali causano grandi mutamenti che sono molto simili al mutamento dal dc8 al dc8 allungato, e alcuni di questi mutamenti, pur essendo in un certo senso «macro»-mutazioni, sono stati decisamente incorporati nell'evoluzione. I serpenti, per esempio, hanno tutti un numero di vertebre molto maggiore di quello dei loro progenitori. Noi potremmo essere certi di questo fatto anche se non avessimo fossili, poiché i serpenti hanno un numero di vertebre molto maggiore rispetto ai loro cugini che sono sopravvissuti. Inoltre varie specie di serpenti hanno un numero di vertebre diverso, cosa che induce a pensare che il loro numero di vertebre dev'essere mutato nel corso dell'evoluzione dopo l'epoca del loro progenitore comune, e anche abbastanza spesso.

Ora, perché il numero delle vertebre in un animale possa cambiare, occorre qualcosa di più del semplice inserimento di un osso extra. A ogni vertebra è infatti associato un insieme di nervi, di vasi sanguigni, di muscoli ecc., esattamente come a ogni fila di sedili in un aereo è associato un insieme di cuscini, un insieme di poggiatesta, un insieme di prese per cuffia, un insieme di lampade per la lettura con i relativi fili elettrici ecc. La parte mediana del corpo di un serpente, come la parte mediana del corpo di un aereo di linea, è composta da un certo numero di segmenti, molti dei quali sono esattamente simili fra loro, per quanto complessi possano essere singolarmente. Perciò, per aggiungere nuovi segmenti, tutto ciò che si deve mettere in atto è un semplice processo di duplicazione. Poiché i meccanismi genetici per produrre un segmento di serpente - meccanismi genetici di grande complessità, che impiegarono per formarsi molte generazioni di evoluzione graduale, passo passo - esistono già, nuovi segmenti identici possono essere aggiunti facilmente per mezzo di singole mutazioni. Se noi pensiamo ai geni come a «istruzioni per sviluppare un embrione», un gene per inserire segmenti extra può essere letto semplicemente come «qui aggiungi un altro elemento uguale». Io immagino che le istruzioni per costruire il primo dc8 allungato siano state abbastanza simili a questa.

Possiamo essere certi che, nell'evoluzione dei serpenti, il numero delle vertebre mutò sempre di numeri interi e mai di frazioni. È impossibile immaginare un serpente con 26,3 vertebre.

Un serpente o aveva 26 vertebre o ne aveva 27, ed è chiaro che dovettero esserci casi in cui un serpente figlio aveva almeno un'intera vertebra più dei suoi genitori. Ciò significa che esso doveva avere un'intera serie extra di nervi, vasi sanguigni, blocchi di muscoli ecc. In un certo senso, quindi, questo serpente era un macro-mutante, ma solo nel senso debole del dc8 allungato. È facile credere

che singoli serpenti con mezza dozzina di vertebre più dei loro genitori possano avere avuto origine da una sola mutazione. L'«argomento della complessità» contro l'evoluzione a salti non si applica alle macromutazioni del tipo dc8 allungato perché, se esaminiamo in modo dettagliato la natura del mutamento in gioco, ci rendiamo conto che non si tratta di vere macromutazioni in un senso reale. Esse sono macromutazioni solo se consideriamo, ingenuamente, il prodotto finito, l'adulto. Se esaminiamo invece i processi dello sviluppo embrionale, questi risultano essere micromutazioni, nel senso che il grande mutamento apparente nell'adulto è conseguenza di un piccolo mutamento nelle istruzioni embrionali. Lo stesso possiamo dire per l'antennapedia nei moscerini della frutta (*Drosophila*) e per le molte altre cosiddette «mutazioni omeotiche».

Si conclude così la mia digressione sulle macromutazioni e sull'evoluzione a salti. Essa era necessaria perché la teoria degli equilibri punteggiati viene spesso confusa col saltazionismo. È stata comunque pur sempre una digressione, poiché la teoria degli equilibri punteggiati è l'argomento principale di questo capitolo, e questa teoria non presenta in realtà nessuna connessione con le macromutazioni e col vero saltazionismo.

Le «lacune» nella documentazione fossile di cui parlano Eldredge e Gould e gli altri «puntuazionisti» non hanno, quindi, niente a che fare con la vera macroevoluzione, e sono lacune molto più piccole di quelle che suscitano tanta eccitazione nei creazionisti. Inoltre Eldredge e Gould introdussero in origine la loro teoria non come radicalmente e rivoluzionariamente contraria al darwinismo comune, «convenzionale» - che è il modo in cui essa fu spacciata in seguito -, bensì come qualcosa che seguiva dal darwinismo convenzionale, qual era accettato da tempo, purché venisse correttamente inteso. Per conseguire questa comprensione corretta, temo che avremo bisogno di un'altra digressione, questa volta sul problema di come hanno origine nuove specie, il processo noto come «speciazione».

La risposta di Darwin al problema dell'origine delle specie fu, in un senso generale, che le specie erano discese da altre specie.

Inoltre l'albero genealogico della vita è un albero ramificato, il che significa che varie specie moderne possono essere ricondotte a un'unica specie ancestrale. Per esempio, leoni e tigri appartengono oggi a specie diverse ma sono derivati entrambi da una singola specie ancestrale, probabilmente non molto tempo fa.

Tale specie ancestrale potrebbe identificarsi con una delle due specie moderne, oppure potrebbe coincidere con una terza specie moderna, oppure ancora potrebbe essere oggi estinta. Similmente, esseri umani e scimpanzé appartengono oggi chiaramente a specie diverse, ma i loro progenitori, qualche milione di anni fa, appartenevano a una singola specie. La speciazione è un processo attraverso il quale una singola specie divenne due specie, una delle quali potrebbe essere ancora identica alla specie originaria.

La ragione per cui la speciazione è considerata un problema difficile è la seguente. Tutti i membri dell'ipotetica singola specie ancestrale sono interfecondi: per molte persone, in effetti, proprio questo è il significato dell'espressione «singola specie». Perciò, ogni volta che una nuova specie figlia comincia a staccarsi, il distacco rischia di essere frustrato dagli incroci. Possiamo immaginare che i presunti progenitori dei leoni e i presunti progenitori delle tigri non riuscissero a separarsi in quanto continuavano ad accoppiarsi fra loro e continuavano quindi a rimanere simili. Il lettore non deve leggere troppo nel mio uso della parola «frustrato», come se leoni e tigri ancestrali «desiderassero», in qualche senso, separarsi gli uni dagli altri. Il fatto è, semplicemente, che nel corso dell'evoluzione le specie sono andate divergendo fra loro, e a prima vista questo fatto degli incroci ci rende difficile capire in che modo si sia determinata questa divergenza.

Pare quasi certo che la principale risposta corretta a questo problema sia quella ovvia. Non ci sarà alcun problema di incroci se i leoni ancestrali e le tigri ancestrali vennero a trovarsi in parti del mondo diverse e quindi nell'impossibilità di incrociarsi. Ovviamente, non è che essi si siano recati in continenti diversi per poter divergere fra loro: essi non si consideravano affatto leoni ancestrali e tigri ancestrali! Dato però che la singola specie ancestrale si diffuse in continenti diversi, diciamo l'Africa e l'Asia, gli appartenenti alla popolazione che si trovava in Africa non poterono più incrociarsi con i membri della popolazione asiatica perché non si incontravano più. Se ci fu una

tendenza per gli animali sui due continenti a evolversi in direzioni diverse, sotto l'influenza della selezione naturale o sotto l'influenza del caso, gli incroci non costituiscono più una barriera alla loro divergenza e infine essi divennero due specie distinte.

Ho parlato di continenti diversi per maggiore chiarezza, ma il principio della separazione geografica come barriera all'incrocio può applicarsi agli animali che vivono al di là di un deserto, di una catena di montagne, di un fiume o persino di un'autostrada. Esso può applicarsi anche ad animali non separati da alcun'altra barriera che non sia la semplice distanza. I toporagni della Spagna non possono incrociarsi con i toporagni della Mongolia, e possono divergere, evolutivamente parlando, dai toporagni della Mongolia, quand'anche dalla Spagna alla Mongolia esistesse una catena ininterrotta di toporagni che si incrociassero liberamente. L'idea di una separazione geografica come chiave della speciazione è nondimeno più chiara se la pensiamo nei termini di una barriera fisica reale, come il mare o una catena di montagne. Le catene di isole, in effetti, sono probabilmente un fertile terreno di origine di nuove specie.

Questa è dunque la nostra visione neodarwiniana ortodossa di come ha origine una specie tipica, per divergenza da una specie ancestrale. Si prende l'avvio dalla specie ancestrale, una grande popolazione di animali piuttosto uniformi che si incrociano liberamente fra loro, dispersi su un'estesa massa continentale. Potrebbe trattarsi di qualsiasi sorta di animali, ma continuiamo a pensare ai toporagni. La massa continentale è divisa in due da una catena di montagne. Questo è un territorio ostile, ed è improbabile che i toporagni lo attraversino; l'impresa non è però del tutto impossibile, e qualche volta degli individui riescono a raggiungere le pianure dall'altro lato. Qui essi possono prosperare, e danno origine a una popolazione periferica della specie, che non ha rapporti con la parte principale della popolazione. Ora le due popolazioni rimangono reciprocamente isolate e gli individui di ciascuna popolazione si incrociano liberamente fra loro, mescolando i loro geni da ciascun lato della montagna ma non attraverso la montagna. Al passare del tempo, ogni mutamento nella composizione genetica di una popolazione si diffonde attraverso l'attività di incrocio fra i suoi membri, senza estendersi però all'altra popolazione. Alcuni di questi mutamenti possono essere determinati dalla selezione naturale, la quale può essere diversa ai due lati della catena di montagne: è infatti difficile attendersi che condizioni meteorologiche, predatori e parassiti siano esattamente gli stessi ai due lati di questa barriera geografica. Altri potrebbero essere dovuti al solo caso. Quali che siano le cause dei mutamenti genetici, gli incroci tenderanno a diffonderli all'interno di ciascuna delle due popolazioni, ma non fra le due popolazioni. Così esse divergeranno geneticamente, differenziandosi sempre più fra loro.

Dopo un po' di tempo le due popolazioni saranno diventate così diverse fra loro che i naturalisti propenderanno per vederle come appartenenti a «razze» diverse. Dopo un tempo più lungo si saranno così diversificate che dovremmo classificarle come specie diverse. Immaginiamo ora che il clima si riscaldi, così che il viaggio attraverso i valichi montani diventi più facile e che una parte degli individui della nuova specie comincino piano piano a far ritorno ai territori ancestrali. Quando si incontrano con i discendenti dei loro cugini, con cui avevano perduto da molto tempo i contatti, il loro corredo genetico risulta mutato a tal punto che essi non sono più interfecondi. Quando l'ibridazione riesce, la prole che ne deriva è malata o sterile come i muli. Così la selezione naturale penalizza ogni tendenza, da parte di individui di entrambe le parti, all'ibridazione con l'altra specie o persino con l'altra razza. La selezione naturale perfeziona in tal modo il processo dell'«isolamento riproduttivo» iniziato con l'interposizione casuale di una catena di montagne. A questo punto la «speciazione» è completa. Ora abbiamo due specie dove in precedenza ce n'era una, e le due specie possono coesistere nella stessa area senza incrociarsi fra loro.

In realtà è improbabile che le due specie riescano a coesistere molto a lungo. Questo non a causa della possibilità di tornare a incrociarsi, ma perché sarebbero in competizione fra loro. È un principio di ecologia diffusamente accettato che due specie con lo stesso stile di vita non possano coesistere a lungo in un posto in quanto entrano in competizione fra loro e l'una o l'altra finisce con l'essere condannata all'estinzione. Ovviamente le nostre due popolazioni di toporagni potrebbero non avere più lo stesso stile di vita; per esempio, la nuova specie, durante il suo periodo di evoluzione dall'altra parte delle montagne, potrebbe essersi specializzata nella predazione a danno

di tipi di insetti diversi.

Se invece fra le due specie c'è una competizione degna di nota, la maggior parte degli ecologi si attenderebbero che nell'area di sovrapposizione l'una o l'altra specie si estinguesse. Se a estinguersi fosse la specie originaria, ancestrale, diremmo che essa è stata soppiantata dalla specie nuova, immigrante.

La teoria della speciazione come conseguenza di una iniziale separazione geografica è stata per parecchio tempo una pietra miliare del neodarwinismo ortodosso, ed è ancora accettata da tutti come il processo principale per mezzo del quale hanno origine nuove specie (alcuni autori pensano che ce ne siano anche altri). La sua inclusione nel darwinismo moderno fu dovuta in gran parte all'influenza del distinto zoologo Ernst Mayr. Quel che fecero i puntuzionisti, quando proposero per la prima volta la loro teoria, fu di chiedersi: dato che, come la maggior parte dei neodarwiniani, noi accettiamo la teoria ortodossa che la speciazione prenda l'avvio dall'isolamento geografico, che cosa dovremmo attenderci di osservare nella documentazione fossile?

Richiamiamo alla mente la nostra popolazione ipotetica di toporagni, con la nuova specie che, dopo avere cominciato a divergere dalla popolazione principale dal lato lontano della catena di montagne, aveva poi fatto ritorno nel suo territorio originario e aveva infine spinto la specie ancestrale all'estinzione.

Supponiamo che questi toporagni avessero lasciato dei fossili, e addirittura che la documentazione fossile fosse perfetta, senza lacune dovute alla sfortunata omissione di stadi chiave. Che cosa dovremmo attenderci di trovare documentato in quei fossili?

Una transizione uniforme dalla specie ancestrale alle specie figlie? Certamente no, almeno se scaviamo nella massa continentale principale in cui vissero i toporagni ancestrali originari, e in cui la nuova specie fece poi ritorno. Pensiamo alla storia di ciò che accadde in realtà nella massa continentale principale.

C'erano toporagni ancestrali che vivevano e si riproducevano felicemente, non avendo alcuna ragione particolare per cambiare.

Non c'è alcuna difficoltà ad ammettere che i loro cugini dall'altro lato delle montagne stessero evolvendosi attivamente, ma i loro fossili si trovano tutti al di là delle montagne, cosicché noi non li troviamo nella massa continentale principale in cui stiamo scavando. Poi, d'improvviso (d'improvviso nella scala di tempo geologica) la nuova specie ritorna nel territorio d'origine, entra in competizione con la specie principale e forse la sostituisce. D'improvviso i fossili che troviamo salendo su per gli strati della massa continentale principale mutano. In precedenza i fossili erano tutti della specie ancestrale. Ora, bruscamente e senza transizioni visibili, appaiono fossili della nuova specie, e i fossili della vecchia specie scompaiono.

Le «lacune», lungi dall'essere tediose imperfezioni o motivi di imbarazzo, risultano essere esattamente quel che dovremmo concretamente attenderci se prendiamo sul serio la nostra ortodossa teoria neodarwiniana della speciazione. La ragione per cui la «transizione» da specie ancestrali a specie discendenti appare brusca è semplicemente che, quando osserviamo una sequenza di fossili riportati in luce in una località, non osserviamo probabilmente affatto un evento evolucionistico, bensì un evento migratorio, l'arrivo di una nuova specie da un'altra area geografica. Senza dubbio ci furono eventi evolutivi, e una specie si sviluppò realmente, forse in modo graduale, da un'altra. Ma per poter vedere la transizione evolutiva documentata nei fossili, dovremmo scavare altrove: in questo caso dall'altro lato delle montagne.

L'osservazione di Eldredge e Gould avrebbe potuto quindi essere presentata più modestamente come un utile salvataggio di Darwin e dei suoi successori da quella che era parsa loro una scomoda difficoltà. E questo fu, in effetti, il modo in cui fu presentata in principio. I darwiniani si erano sempre preoccupati dell'apparente lacunosità della documentazione fossile ed erano parsi costretti a ricorrere ad argomentazioni speciali per spiegare l'imperfezione delle prove. Lo stesso Darwin aveva scritto: Ho tentato di dimostrare che la documentazione geologica è estremamente incompleta [...] Queste cause [...] spiegano in larga misura perché - pur trovando numerosi legami - non incontriamo un numero infinito di varietà, che colleghino fra di loro con gradazione perfetta tutte le forme estinte e viventi [...] Chiunque si rifiuti di ammettere l'imperfezione dei documenti geologici

dovrà respingere tutta la mia teoria, (capitolo XI)

Eldredge e Gould avrebbero potuto ridurre a questo il loro messaggio principale: non preoccuparti, Darwin: anche se la documentazione fossile fosse perfetta, non dovresti attenderti di vedere una progressione graduata finemente scavando solo in un luogo, per la semplice ragione che la maggior parte del mutamento evoluzionistico si verificò in qualche altro luogo! Essi avrebbero potuto spingersi ancora oltre e dire: Darwin, quando hai detto che la documentazione fossile era imperfetta, stavi minimizzando. Non solo è imperfetta, ma ci sono buone ragioni per attendersi che sia particolarmente imperfetta proprio quando diventa interessante, proprio quando sta avendo luogo il mutamento evoluzionistico; ciò si deve in parte al fatto che l'evoluzione si è verificata di solito in un posto diverso da quelli in cui troviamo la maggior parte dei nostri fossili e in parte al fatto che, anche se siamo abbastanza fortunati da scavare in una delle piccole aree esterne in cui si è verificata la maggior parte del mutamento evoluzionistico, quel mutamento evoluzionistico (anche se ancora graduale) occupa un tempo così breve che ci occorrerebbe una documentazione fossile eccezionalmente ricca per poterlo seguire! Specialmente nei loro scritti posteriori, nei quali furono seguiti con grande attenzione da molti giornalisti, essi preferirono invece spacciare le loro idee come radicalmente opposte a quelle di Darwin e anche alla sintesi neodarwiniana. Essi fecero questo sottolineando il gradualismo della visione darwiniana dell'evoluzione in contrapposizione al loro proprio puntuazionismo, caratterizzato da mutamenti improvvisi, irregolari e sporadici. Essi, e specialmente Gould, videro addirittura delle analogie fra la loro posizione e le vecchie scuole del «catastrofismo» e del «saltazionismo». Del saltazionismo ci siamo già occupati. Il catastrofismo fu un tentativo del Settecento e dell'Ottocento di riconciliare una qualche forma di creazionismo con gli scomodi fatti della documentazione fossile. I catastrofisti credevano che il carattere apparentemente progressivo della documentazione fossile riflettesse in realtà una serie di creazioni discrete, ciascuna delle quali doveva essersi conclusa con un'estinzione di massa catastrofica. La più recente di queste catastrofi era stata il diluvio di Noè.

I confronti fra il moderno puntuazionismo da un lato e il catastrofismo o saltazionismo dall'altro hanno una forza puramente poetica. Essi sono, se posso coniare un ossimoro, profondamente superficiali: sembrano impressionanti su un piano pseudoartistico, letterario, ma non danno alcun contributo a una comprensione seria, e per di più potendo fornire un aiuto e conforto spuri ai moderni creazionisti nella loro lotta, spesso coronata da qualche successo, per sovvertire l'istruzione e l'editoria scolastica in America. Il fatto è che, nel senso più pieno e più serio, Eldredge e Gould sono in realtà altrettanto gradualisti quanto Darwin o qualunque fra i suoi seguaci. La differenza consiste solo nel fatto che essi vorrebbero comprimere l'intero mutamento graduale in brevi esplosioni di attività anziché lasciare che continui sempre; e sottolineano che la maggior parte del mutamento graduale si verifica in aree geografiche lontane da quelle in cui vengono portati alla luce la maggior parte dei fossili.

Non è dunque in realtà al gradualismo di Darwin che si oppongono i puntuazionisti: gradualismo significa che ogni generazione è solo lievemente diversa dalla generazione precedente; occorrerebbe essere macroevoluzionisti per opporsi a questa tesi ed Eldredge e Gould non lo sono. Risulta piuttosto che essi e altri puntuazionisti si oppongono alla presunta fede di Darwin nella costanza dei ritmi di evoluzione. Essi obiettano a tale fede perché pensano che l'evoluzione (che è ancora innegabilmente un'evoluzione gradualistica) abbia luogo rapidamente durante esplosioni relativamente brevi di attività (eventi di speciazione, i quali forniscono una sorta di atmosfera di crisi in cui la presunta resistenza normale al mutamento evoluzionistico è infranta); e che l'evoluzione abbia luogo molto lentamente o per nulla durante i lunghi periodi interposti di stasi. Quando diciamo «relativamente» brevi intendiamo, ovviamente, brevi rispetto alla scala di tempo geologica in generale. Persino le esplosioni improvvise di attività dei puntuazionisti, pur potendo essere considerate istantanee a una scala di tempo geologica, hanno ancora una durata che si misura in decine o centinaia di migliaia di anni.

È illuminante in proposito una riflessione del famoso evoluzionista americano G. Ledyard Stebbins. Egli non è specificamente interessato all'evoluzione a salti, ma cerca di drammatizzare la rapidità con cui il mutamento evolutivo può aver luogo, visto di contro alla scala temporale del tempo

geologico disponibile. Egli immagina una specie di animale delle dimensioni pressa poco di un topo. Suppone quindi che la selezione naturale cominci a favorire un aumento della mole corporea, ma solo molto leggermente. Forse i maschi più grossi godono di un lieve vantaggio nella competizione per le femmine. Ogni volta i maschi di dimensioni medie hanno leggermente meno successo dei maschi un pochino più grossi della media. Stebbins attribuisce al vantaggio matematico goduto dagli individui più grossi nel suo esempio ipotetico un valore quantitativo esatto. Egli assegna a tale vantaggio un valore così piccolo da non risultare misurabile da osservatori umani. E il ritmo del mutamento evolutivo che esso determina è di conseguenza così lento da non essere rilevabile nella durata di una vita umana normale. Per quanto concerne il punto di osservazione dello scienziato che studia l'evoluzione sul campo, quindi, questi animali non si evolvono affatto. Nondimeno essi stanno evolvendosi, benché a un ritmo molto lento - che è quello dato dall'assunto matematico di Stebbins -, ma persino a un ritmo così blando essi finirebbero col raggiungere le dimensioni di un elefante. Quanto tempo richiederebbe un tale sviluppo? Un tempo ovviamente lungo a una scala umana, ma in casi come questi le scale umane non sono pertinenti. Stiamo infatti parlando di tempo geologico.

Stebbins calcola che a questo ritmo evolutivo lentissimo occorrerebbero per l'evoluzione di un animale, da un peso medio di 40 grammi (dimensioni del topo) a un peso medio di oltre 6.000.000 di grammi (dimensioni dell'elefante), circa 12.000 generazioni. Supponendo per ogni generazione una durata di 5 anni, che è più lunga di quella di un topo ma più breve di quella di un elefante, 12.000 generazioni occuperebbero circa 60.000 anni. 60.000 anni sono un tempo troppo breve per essere misurato dagli usuali metodi geologici di datazione della documentazione fossile. Come dice Stebbins: «L'origine di una nuova specie di animale in 100.000 anni o meno è considerata dalla paleontologia come "improvvisa" o "istantanea"».

I punteggiatori non parlano di salti nell'evoluzione, bensì di episodi di evoluzione relativamente rapida. E persino questi episodi non hanno bisogno di apparire rapidi su scala umana per apparire istantanei alla scala geologica. Qualunque cosa possiamo pensare della teoria degli equilibri punteggiati in sé, è troppo facile confondere il gradualismo (la convinzione, nutrita dai moderni punteggiatori oltre che da Darwin, che non ci siano salti improvvisi fra una generazione e la seguente) con la concezione dell'«evoluzione a velocità costante» (alla quale i punteggiatori si oppongono, attribuendola, a torto, a Darwin).

Queste due concezioni non sono affatto la stessa cosa. Il modo appropriato per caratterizzare le convinzioni dei punteggiatori è il seguente: «brevi episodi di rapido mutamento graduale, intervallati a lunghi periodi di "stasi" (ristagno evolutivo)». L'accento viene posto quindi sui lunghi periodi di stasi, visti come il fenomeno in precedenza trascurato che ha bisogno in realtà di una spiegazione. Il vero contributo dei punteggiatori è l'accento da loro posto sulla stasi, non la loro presunta opposizione al gradualismo, giacché essi sono in verità gradualisti non meno di tutti gli altri.

Persino l'accento sulla stasi si può trovare, in forma meno esagerata, nella teoria della speciazione di Mayr. Questi credeva che, delle due razze geograficamente separate, la grande popolazione ancestrale originaria sia meno soggetta a mutare della nuova popolazione «figlia» (dall'altro lato delle montagne nel caso del nostro esempio dei toporagni). Ciò non si deve solo al fatto che la popolazione figlia è quella che si è trasferita in nuove aree in cui è probabile che le condizioni siano diverse e le pressioni della selezione naturale mutate, bensì al fatto che ci sono ragioni teoriche (sottolineate da Mayr ma la cui importanza è opinabile) per pensare che grandi popolazioni di individui interfecondi abbiano una tendenza intrinseca a resistere al mutamento evolutivo.

Un'analogia idonea è l'inerzia di un grande oggetto pesante, difficile da spostare. Piccole popolazioni periferiche, grazie alla loro piccola mole, hanno secondo la teoria maggiori probabilità intrinseche di evolversi. Perciò, benché io abbia parlato delle due popolazioni o razze di toporagni come divergenti l'una dall'altra, Mayr preferirebbe vedere la popolazione originaria, ancestrale, come relativamente statica, e la nuova popolazione come divergente da essa. Il ramo dell'albero evolutivistico non si biforca in due rami uguali, ma c'è un tronco principale da cui si stacca un minuscolo ramo laterale.

I proponenti degli equilibri punteggiati accolsero questo suggerimento di Mayr e lo dilatarono in una forte convinzione che la «stasi», o assenza di mutamento evolutivo, sia la norma per una specie. Essi ritengono che in grandi popolazioni esistano forze genetiche che resistono attivamente al mutamento evoluzionistico. Il mutamento evoluzionistico, secondo loro, è un evento raro, coincidente con la speciazione, nel senso che, a loro modo di vedere, le condizioni nelle quali si formano nuove specie - la separazione geografica di piccole subpopolazioni isolate - sono le condizioni stesse sotto cui le forze che normalmente resistono al mutamento evolutivo si allentano o vengono sopraffatte. La speciazione corrisponde a un tempo di insurrezione, o di rivoluzione. Ed è proprio durante questi tempi di sconvolgimento che si concentra il mutamento evolutivo, mentre per la maggior parte della sua storia una linea genealogica ristagna.

Non è vero che Darwin credesse che l'evoluzione procede a un ritmo costante. Certamente non lo credeva nel senso ridicolmente estremo da me messo in satira nella mia parabola dei figli di Israele, e io non credo che vi credesse in alcun senso importante. La citazione del brano seguente, ben noto, dalla quarta edizione (e edizioni successive) dell'*Origine delle specie* irrita Gould in quanto egli pensa che esso non sia rappresentativo del pensiero generale di Darwin: Molte specie una volta formatesi non subiscono alcun ulteriore mutamento [...] è probabile che i periodi durante i quali ciascuna ha subito delle modificazioni, sebbene numerosi e lunghi se computati in anni, siano stati brevi in confronto ai periodi durante i quali ogni specie è rimasta immutata, (capitolo XI)

Gould desidera minimizzare questa frase e altre simili a essa, dicendo: Non si può fare la storia per mezzo di citazioni scelte e della ricerca di precisazioni e limitazioni contenute in note a piè di pagina. I criteri appropriati sono il tenore generale e l'impatto storico.

I contemporanei o i discendenti di Darwin lo lessero mai come un saltazionista?

Gould ha ovviamente ragione sul tenore generale e sull'impatto storico, ma l'ultima frase del brano citato è un passo falso estremamente rivelatore. Ovviamente, nessuno ha mai letto Darwin come un sostenitore dell'evoluzione per salti e, fatto altrettanto ovvio, Darwin fu sempre ostile a una concezione del genere; ma il punto è che, quando ci occupiamo della nozione di equilibri punteggiati, non è affatto in discussione l'evoluzione per salti. Come ho già sottolineato, la teoria degli equilibri punteggiati, per ammissione di Eldredge e di Gould, non è una teoria macroevoluzionistica, ossia non ammette l'evoluzione per salti. I salti che essa postula non sono veri salti, compiuti nell'arco di una singola generazione. Essi sono diffusi su un gran numero di generazioni, nell'arco di periodi che, in una stima dello stesso Gould, possono estendersi su forse decine di migliaia di anni. La teoria degli equilibri punteggiati è una teoria gradualistica, anche se insiste sull'esistenza di lunghi periodi di stasi inframmezzati con esplosioni relativamente brevi di evoluzione gradualistica. Gould è stato sviato dall'accento retorico da lui posto sulla somiglianza puramente poetica o letteraria fra il puntuzionismo da un lato e il vero saltazionismo dall'altro.

Io penso che a questo punto possa essere utile, per chiarire l'argomento, compendiare una varietà di punti di vista possibili sui ritmi dell'evoluzione. In una posizione pericolosa abbiamo la vera macroevoluzione, di cui mi sono già occupato a sufficienza.

Questa forma di evoluzione non ha autentici sostenitori fra i biologi moderni. Chiunque non sia un sostenitore del saltazionismo è un gradualista, e fra questi sono anche Eldredge e Gould, comunque decidano di volersi presentare. All'interno del gradualismo possiamo distinguere diverse convinzioni sui ritmi dell'evoluzione (graduale). Alcune di queste convinzioni, come abbiamo visto, presentano una somiglianza puramente superficiale («letteraria» o «poetica») col vero saltazionismo antigradualistico, ed ecco perché possono venire talvolta confuse con questo.

A un altro estremo abbiamo la sorta di «evoluzione a velocità costante» che ho rappresentato in modo caricaturale nella parabola dell'Esodo con cui ho iniziato questo capitolo. Un fautore della forma estrema dell'evoluzione a velocità costante crede che l'evoluzione proceda sempre in modo continuo e inesorabile, sia o no in corso un fenomeno di ramificazione o di speciazione. Egli crede che la quantità di mutamento evolutivo sia strettamente proporzionale al tempo trascorso. Per una curiosa ironia, una forma di questa convinzione ha recentemente acquistato molto credito fra i moderni genetisti molecolari. Si possono addurre buoni argomenti a sostegno della tesi che il mutamento evolutivo al livello delle molecole di proteine proceda in realtà a un ritmo costante,

esattamente come gli ipotetici figli di Israele; e questo anche se caratteri esteriormente osservabili come braccia e gambe si evolvono in una maniera altamente punteggiata. Ci siamo già imbattuti in questo argomento nel capitolo V, e io tornerò a menzionarlo nel capitolo seguente. Ma per quanto concerne l'evoluzione adattiva di strutture e modelli di comportamento su vasta scala, nessuno fra gli evoluzionisti accetterebbe mai la nozione di un'evoluzione a velocità costante, e senza dubbio l'avrebbe rifiutata anche Darwin. Chiunque non sia un sostenitore dell'evoluzione a velocità costante, è un sostenitore dell'evoluzione a velocità variabile.

All'interno della nozione che l'evoluzione proceda a velocità variabile, dobbiamo distinguere due tipi di convinzione diversi, che possiamo designare come «evoluzione a velocità variabile discreta» ed «evoluzione a velocità variabile in modo continuo». Un «discretista» estremo non solo crede che l'evoluzione abbia una velocità variabile, ma pensa che la velocità passi in modo brusco da un livello discreto a un altro, come il cambio di velocità di una macchina. Egli potrebbe credere, per esempio, che l'evoluzione abbia solo due velocità: molto veloce e ferma (non posso fare a meno di ricordare l'umiliazione del primo giudizio scolastico scritto su di me dalla direttrice della mia scuola quando avevo sette anni, valutando le mie prestazioni nel piegare gli indumenti, fare un bagno freddo e altre routine quotidiane della scuola elementare: «Dawkins ha solo tre velocità: lento, molto lento e fermo»). L'evoluzione «fermata» è la «stasi» che, secondo i punteggiatori, sarebbe caratteristica di grandi popolazioni. L'evoluzione in presa diretta è quella che si ha durante la speciazione, in piccole popolazioni dinamiche isolate alla periferia di grandi popolazioni evolutivamente statiche. Secondo questa concezione, l'evoluzione si trova sempre in corrispondenza di una delle due posizioni del cambio, mai in una posizione intermedia. Eldredge e Gould tendono al discretismo, e sotto questo aspetto sono autenticamente radicali.

Essi potrebbero essere chiamati «discretisti variabili». Per inciso, non c'è alcuna ragione particolare per cui un discretista variabile debba necessariamente insistere sulla speciazione come il tempo in cui l'evoluzione è in presa diretta. In pratica, però, la maggior parte di loro lo fa.

I sostenitori della «velocità discreta variabile in modo continuo» credono invece che la rapidità dell'evoluzione fluttui in modo continuo da molto veloce a molto lenta a ferma, con tutte le gradazioni intermedie. Essi non vedono alcuna particolare ragione per insistere su certe velocità più che su certe altre. In particolare, per loro la stasi è solo un caso estremo di evoluzione lentissima. Per un punteggiatore nella stasi c'è qualcosa di molto speciale. La stasi, per lui, non è solo un'evoluzione così lenta da avere velocità zero, non è solo un'assenza passiva di evoluzione a causa della mancanza di una forza che spinga a favore del mutamento. Essa rappresenta piuttosto una resistenza positiva al mutamento evolutivo. È quasi come se si pensasse che le specie presentassero una resistenza attiva per non evolversi, nonostante l'esistenza di forze che spingono a favore dell'evoluzione.

Sono in maggior numero i biologi che concordano sull'esistenza della stasi come fenomeno reale che non quelli che si trovano d'accordo sulle sue cause. Consideriamo, per fare un esempio estremo, il celacanto Latimeria. I celacanti erano un gruppo molto esteso di «pesci» (in realtà, benché vengano chiamati pesci, sono imparentati più strettamente con noi di quanto non lo siano con le trote o con le aringhe), che prosperarono più di 250 milioni di anni fa e che si estinsero a quanto pare pressa poco alla stessa epoca dei dinosauri. Dico «a quanto pare» perché nel 1938, con grande stupore del mondo zoologico, uno strano pesce, lungo quasi un metro e mezzo e con pinne insolite simili a gambe, apparve nella rete di un peschereccio d'alto mare, al largo della costa del Sudafrica. Anche se il pesce andò quasi distrutto prima che ne venisse riconosciuto il valore inestimabile per la scienza, i suoi resti in decomposizione furono fortunatamente sottoposti appena in tempo all'esame di un autorevole zoologo sudafricano. Non riuscendo a credere ai suoi occhi, egli lo identificò come un celacanto vivente, e lo chiamò Latimeria. Da allora nella stessa area ne sono stati pescati alcuni altri esemplari, e la specie è stata studiata e descritta in modo appropriato. Il celacanto è un «fossile vivente», nel senso che è mutato assai poco dal tempo dei suoi progenitori fossili di centinaia di milioni di anni fa.

Abbiamo dunque la stasi. Ma che cosa dobbiamo farne? Come spiegarla? Alcuni di noi direbbero che la linea genealogica che conduce alla Latimeria rimase immutata perché la selezione naturale

non la costrinse a muoversi. In un certo senso essa non ebbe alcun «bisogno» di evolversi perché questi animali avevano trovato un modo di vita efficace negli abissi marini, dove le condizioni non mutarono molto. Forse non parteciparono mai ad alcuna corsa agli armamenti. I loro cugini che uscirono dal mare per andare a colonizzare le terre emerse si svilupparono perché vi furono costretti dalla selezione naturale, sotto una varietà di condizioni ostili fra cui corse agli armamenti. Altri biologi, fra cui alcuni di quelli che si definiscono puntuzionisti, potrebbero dire che la linea filogenetica che conduce alla moderna Latimeria resistette attivamente al mutamento, nonostante le pressioni della selezione naturale eventualmente presenti.

Chi ha ragione? Nel caso particolare della Latimeria è un problema di difficile risoluzione, ma esiste un modo in cui, in linea di principio, possiamo cercare di scoprirlo.

Per equità, è opportuno mettere da parte l'esempio particolare della Latimeria. Essa è un esempio molto efficace, ma anche molto estremo, e non è uno di quelli su cui i puntuzionisti desiderino contare particolarmente. Essi sono convinti che esistano in gran numero esempi di stasi meno estremi e a più breve termine; essi sarebbero, in effetti, la norma, poiché le specie posseggono secondo loro meccanismi genetici che resistono attivamente al mutamento, anche quando ci sono forze della selezione naturale che premono per farle mutare. Ora, ecco l'esperimento semplicissimo che, almeno in linea di principio, possiamo fare per verificare quest'ipotesi. Possiamo prendere popolazioni di animali in libertà e sottoporle a forze di selezione create da noi. Ammettendo l'ipotesi che le specie resistano attivamente al mutamento, dovremmo trovare che, se tentiamo di mettere in atto incroci selettivi per ottenere certe qualità, le specie dovrebbero rifiutarsi, almeno per un po' di tempo, di prestarsi ai nostri piani. Se prendiamo dei bovini e tentiamo di incrociarli selettivamente per ottenere, per esempio, una maggiore produzione di latte, dovremmo fallire nel nostro intento. I meccanismi genetici delle specie dovrebbero mobilitare le loro forze antievolutive in una lotta contro la pressione al mutamento. Se noi cercassimo di indurre le galline a evolvere una maggiore frequenza nella produzione di uova, dovremmo fallire. Se gli organizzatori delle corride, nel tentativo di rendere più spettacolare il loro deprecabile «sport», cercassero di migliorare la combattività dei tori mediante incroci selettivi, i loro sforzi dovrebbero essere condannati all'insuccesso. Questi insuccessi dovrebbero essere ovviamente solo temporanei. Infine, come una diga che cede sotto la pressione delle acque, le presunte forze antievolutive saranno sopraffatte, e la linea genealogica potrà spostarsi rapidamente verso un nuovo equilibrio. Ogni volta che intraprendiamo un nuovo programma di incroci selettivi noi dovremmo però imbatterci almeno in un po' di resistenza iniziale.

In realtà, quando tentiamo di determinare un'evoluzione incrociando selettivamente animali e piante in cattività, noi non ci imbattiamo in insuccessi, né sperimentiamo alcuna difficoltà iniziale. Le specie di animali e di piante rispondono subito docilmente agli incroci selettivi, e i riproduttori non percepiscono l'azione di alcuna forza antievolutiva intrinseca. Semmai, essi sperimentano della difficoltà solo dopo un certo numero di generazioni di incroci selettivi coronati da successo. Ciò si deve al fatto che, dopo qualche generazione di incroci selezionati, la variazione genetica disponibile si esaurisce, e dobbiamo attendere nuove mutazioni. È concepibile che i celacanti abbiano smesso di evolversi perché smisero di avere mutazioni - forse perché furono protetti dai raggi cosmici standosene negli abissi marini! - ma nessuno, a quanto ne so, ha suggerito seriamente una cosa del genere, e in ogni caso non è questo che intendono i puntuzionisti quando parlano di specie che avrebbero una resistenza innata al mutamento evoluzionistico.

Essi intendono qualcosa di più simile all'osservazione che ho fatto nel capitolo VII sulla «cooperazione» fra geni: l'idea che gruppi di geni siano così ben adattati fra loro da resistere all'invasione da parte di nuovi geni mutanti che non siano membri del gruppo. Questa è un'idea molto complessa e può essere resa plausibile. Essa fu in effetti uno dei sostegni teorici dell'idea di inerzia di Mayr alla quale abbiamo già accennato. Nondimeno, il fatto che ogni volta che intraprendiamo incroci selettivi non ci imbattiamo in alcuna resistenza iniziale, mi induce a pensare che, se una linea genealogica in condizioni naturali rimane per molte generazioni esente da mutamento, ciò non si debba tanto a una resistenza intrinseca al mutamento quanto piuttosto all'assenza di una pressione della selezione naturale a favore del mutamento. Una popolazione non

muta perché gli individui che rimangono immutati sopravvivono meglio degli individui che cambiano.

I puntuzionisti sono quindi in realtà altrettanto gradualisti quanto Darwin o qualsiasi darwiniano; l'unica differenza consiste nel fatto che essi interpongono fra le esplosioni di attività dell'evoluzione graduale lunghi periodi di stasi. Come ho detto, l'unico aspetto sotto cui i puntuzionisti differiscono da altre scuole del darwinismo è nel forte accento che pongono sulla stasi come su qualcosa di positivo: come resistenza attiva al mutamento evoluzionistico piuttosto che, semplicemente, come assenza di mutamento evoluzionistico. E questo è l'unico aspetto in cui essi sono probabilmente in errore. Per me rimane da chiarire il mistero del perché essi abbiano pensato di essere così lontani da Darwin e dal neodarwinismo.

La risposta risiede in una confusione fra due significati della parola «graduale», associata all'altra confusione, che già mi sono dato da fare per disperdere ma che permane con ostinazione nella mente di molti, fra puntuzionismo e saltazionismo. Darwin era appassionatamente contrario a quest'ultimo, e questo fatto lo condusse a sottolineare ripetutamente l'estrema gradualità dei mutamenti evoluzionistici che stava proponendo. La ragione di questo suo atteggiamento va vista nel fatto che, per lui, l'evoluzione per salti significava quella che io ho chiamato la macromutazione del Boeing 747. Essa significava l'origine improvvisa - come quella di Pallade Atena dalla testa di Zeus - di un complesso di organi nuovo di zecca in un singolo colpo di bacchetta magico-genetica. Essa significava l'origine da una chiazza di pelle nuda, in una singola generazione, di occhi complessi funzionanti, pienamente formati. La ragione per cui l'evoluzione per salti significava queste cose per Darwin è che questo è esattamente ciò che essa significava per alcuni fra i suoi oppositori più influenti, i quali credevano realmente in essa come in un fattore importante nell'evoluzione.

Il duca di Argyll, per esempio, accettava le prove del fatto dell'evoluzione, ma voleva far rientrare la creazione divina per la porta di servizio. Non era il solo. In luogo di una singola creazione, avvenuta una volta per tutte nel Giardino dell'Eden, molti vittoriani pensavano che Dio fosse intervenuto ripetutamente, in punti cruciali dell'evoluzione. Si pensava che organi complessi come gli occhi, anziché evolversi lentamente per gradi da occhi più semplici, come aveva suggerito Darwin, avessero avuto origine in un singolo istante. Tali persone ritenevano giustamente che in tale istante devoluzione», se esisteva, avesse richiesto un intervento soprannaturale. Le ragioni di questo modo di vedere sono le stesse ragioni statistiche di cui mi sono già occupato in connessione con gli uragani e i Boeing 747. Il saltazionismo Boeing 747 non è, in effetti, altro che una forma annacquata di creazionismo. Per esprimerci in forma inversa, la creazione divina è la forma estrema di saltazionismo. Essa è il salto record dall'argilla inanimata all'uomo pienamente formato. Così la percepì Darwin. In una lettera a Sir Charles Lyell, il principale geologo del suo tempo, scrisse: Se io fossi convinto di aver bisogno di tali aggiunte alla teoria della selezione naturale, la getterei via come immondizia [...] Non darei nulla per la teoria della selezione naturale se essa richiedesse aggiunte miracolose in ogni fase dell'evoluzione.

Queste non sono cose di importanza secondaria. Secondo Darwin il punto essenziale della teoria dell'evoluzione per selezione naturale era che essa forniva una spiegazione non miracolosa dell'esistenza di adattamenti complessi. E questo è anche, per quanto vale, il punto essenziale di questo libro. Per Darwin, qualsiasi evoluzione che dovesse far ricorso all'aiuto di Dio per prendere la rincorsa per i suoi salti non sarebbe affatto un'evoluzione. Un tale espediente toglierebbe ogni significato al punto centrale dell'evoluzione. Alla luce di ciò, è facile vedere perché Darwin insistesse di continuo sulla gradualità dell'evoluzione. È facile vedere perché egli abbia scritto la frase citata nel capitolo IV: Se si potesse dimostrare l'esistenza di un qualche organo complesso che non avrebbe potuto formarsi per numerose lievi modificazioni successive, la mia teoria cadrebbe assolutamente, (capitolo VI)

C'è un altro modo per considerare l'importanza fondamentale della gradualità per Darwin. I suoi contemporanei, come molte persone ancor oggi, avevano difficoltà a credere che il corpo umano e altre entità così complesse avessero potuto avere origine con i mezzi dell'evoluzione. Se supponiamo che l'Amoeba, un protozoo costituito da un'unica cellula, sia un nostro lontano

progenitore - come fino a poco tempo fa era di moda supporre molti trovavano difficile valicare nella loro mente l'abisso che divideva l'ameba e l'uomo. Essi trovavano inconcepibile che da inizi tanto semplici potesse emergere qualcosa di tanto complesso.

Darwin si appellò, come mezzo per superare questa sorta di incredulità, all'idea di una serie graduale di piccoli passi. Può essere difficile immaginare un'ameba che si trasformi in un uomo, suona il suo ragionamento, ma non è difficile immaginare un'ameba che si trasformi in un tipo leggermente diverso di ameba.

Da qui non è difficile immaginare che essa si trasformi in un tipo leggermente diverso di un tipo leggermente diverso di... e così via. Come abbiamo visto nel capitolo III, questo ragionamento è in grado di venire a capo della nostra incredulità, purché sottolineiamo che lungo questa via ci fu un numero estremamente grande di passi, e che ogni passo fu molto piccolo. Darwin lottò costantemente contro questa fonte di incredulità, e fece uso costantemente della stessa arma: l'insistenza sul mutamento graduale, quasi impercettibile, diffuso su innumerevoli generazioni. Per inciso, vale la pena di citare l'esempio caratteristico di pensiero laterale di J.B.S. Haldane nel combattere la stessa fonte di incredulità. Qualcosa di simile alla transizione dall'ameba all'uomo, egli sottolineò, si verifica nel grembo di ogni madre in soli nove mesi. Lo sviluppo del feto è senza dubbio un processo molto diverso dall'evoluzione ma, nondimeno, chiunque sia scettico circa la possibilità di una transizione da una singola cellula all'uomo deve solo contemplare i propri inizi fetali per veder svanire i suoi dubbi. Io spero di non essere considerato un pedante se sottolineo, per inciso, che la scelta dell'ameba per il titolo di progenitore onorario segue semplicemente una tradizione arbitraria. Un batterio sarebbe una scelta migliore, ma persino i batteri, quali li conosciamo, sono organismi moderni.

Per riassumere l'argomento, Darwin insistette molto sulla gradualità dell'evoluzione a causa di ciò contro cui stava lottando: i fraintendimenti sull'evoluzione che erano dominanti nell'Ottocento. Il significato di «graduale», nel contesto di quei tempi, era l'«opposto di evoluzione per salti». Eldredge e Gould, nel contesto del tardo Novecento, usano «graduale» in un senso molto diverso. Essi lo usano, in effetti, anche se non esplicitamente, nel significato di «evoluzione a velocità costante». Senza dubbio in ciò hanno ragione: nella sua forma estrema esso è altrettanto assurdo quanto la mia parabola dell'Esodo.

Ma abbinare questa critica giustificabile a una critica a Darwin significa semplicemente confondere due significati del tutto distinti della parola «graduale». Nel senso in cui Eldredge e Gould si oppongono al gradualismo, non c'è alcuna particolare ragione di dubitare del fatto che Darwin sarebbe stato d'accordo con loro.

Nel senso dell'espressione secondo cui Darwin fu un appassionato gradualista, anche Eldredge e Gould sono gradualisti. La teoria degli equilibri punteggiati è solo una glossa secondaria al darwinismo, una glossa che lo stesso Darwin avrebbe approvato se il problema fosse stato discusso al suo tempo. In quanto glossa secondaria, non merita una misura di pubblicità particolarmente grande. La ragione per cui essa ha invece ricevuto una grande attenzione nei mezzi di comunicazione di massa, e per cui io mi sono sentito in dovere di dedicare a quest'argomento un intero capitolo di questo libro, consiste nel fatto che la teoria stessa è stata spacciata - e con un rilievo eccessivo da parte di taluni giornalisti - come radicalmente opposta alle idee di Darwin e dei suoi successori. Perché è accaduto ciò?

Nel mondo ci sono persone che hanno un desiderio disperato di non dover credere nel darwinismo. Esse sembrano rientrare in tre classi principali. Prima di tutto vengono coloro che, per ragioni religiose, desiderano che l'evoluzione stessa non sia vera. Al secondo posto vengono coloro che non hanno alcuna ragione per negare che l'evoluzione ci sia stata ma che, spesso per ragioni politiche o ideologiche, trovano sgradevole la teoria darwiniana del suo meccanismo. Alcuni di questi considerano l'idea della selezione naturale inaccettabilmente aspra e spietata; altri confondono la selezione naturale con la casualità, e quindi con l'«assenza di significato», cosa che offende la loro dignità; altri ancora confondono il darwinismo col darwinismo sociale, che ha connotazioni razziste e altri risvolti sgradevoli. In terzo luogo, ci sono persone - molte delle quali lavorano nei mass media - alle quali piace follemente veder mandare all'aria la baracca, forse perché

giornalisticamente questi sono fatti che fanno una certa impressione; e il darwinismo è abbastanza affermato e rispettabile per indurre la tentazione di mandarlo all'aria.

Quale che ne sia il motivo, se uno studioso di prestigio accenna una qualche parvenza di critica a un qualsiasi particolare della teoria darwiniana corrente, questo fatto viene accolto con bramosia e gonfiato in modo sproporzionato. Questa bramosia è tanto forte da fornire una sorta di potente amplificatore, con un microfono sensibile a cogliere qualsiasi cosa possa apparire anche minimamente come un'opposizione al darwinismo. È un peccato che sia così perché argomentazioni e critiche serie sono una parte di importanza vitale per ogni scienza, e sarebbe tragico se gli studiosi sentissero il bisogno di mettersi la museruola per non fornire esca alle amplificazioni arbitrarie dei mezzi di comunicazione. Non occorre dire che l'amplificatore, per quanto potente, non è hi-fi: c'è infatti una distorsione considerevole!

Uno scienziato che sussurri prudentemente qualche lieve apprensione su una sfumatura attuale del darwinismo corre il rischio di risentire le sue parole distorte e appena riconoscibili rimbombare e riecheggiare dagli altoparlanti in ansiosa attesa.

Eldredge e Gould non bisbigliano ma parlano ad alta voce, con eloquenza e capacità di persuasione! Ciò che essi gridano è spesso molto sottile, ma il messaggio che viene ricevuto è che nel darwinismo c'è qualcosa di sbagliato. Alleluia, lo hanno detto «gli scienziati» stessi! Il curatore del volume Biblical Creation ha scritto: È innegabile che la credibilità della nostra posizione religiosa e scientifica è stata grandemente rafforzata dal recente sbandamento nel morale neodarwiniano. E questo è qualcosa che noi dobbiamo sfruttare a fondo.

Eldredge e Gould sono stati entrambi valorosi paladini nella lotta contro il creazionismo del Sud rurale. Essi hanno gridato a gran voce la loro protesta per il cattivo uso delle parole, ma solo per trovare che, per questa parte del loro messaggio, i microfoni diventavano improvvisamente assai poco recettivi. Io posso simpatizzare per loro, avendo avuto un'esperienza simile con una diversa serie di microfoni, in questo caso sintonizzati sulla politica anziché sulla religione.

Quel che si deve dire ora, chiaro e forte, è la verità: che la teoria degli equilibri punteggiati si situa chiaramente all'interno della sintesi neodarwiniana. E così è stato sempre. Ci vorrà molto tempo prima di poter rimediare al danno provocato da una retorica eccessiva, ma alla fine ci si riuscirà. La teoria degli equilibri punteggiati sarà vista allora nelle sue giuste proporzioni, come un corrugamento interessante ma secondario sulla superficie della teoria neodarwiniana. Essa certamente non fornisce alcuna base per supporre uno «sbandamento nel morale neodarwiniano», e nessuna base all'affermazione di Gould che la teoria sintetica (un altro nome per il neodarwinismo) «è completamente morta». È come se la scoperta che la Terra non è una sfera perfetta bensì uno sferoide leggermente appiattito ai poli fosse stata presentata con titoli a nove colonne del seguente tenore: copernico in errore: giustificata la teoria della terra piatta Per giustizia, però, va rilevato che l'osservazione di Gould non mirava tanto al presunto gradualismo della sintesi darwiniana quanto a un'altra delle sue tesi, ossia alla tesi, contestata da Eldredge e Gould, che l'intera evoluzione, persino alla scala geologica più grande, sia un'estrapolazione di eventi che hanno luogo all'interno di popolazioni o di specie. Essi credono che ci sia una forma più alta di selezione, che chiamano «selezione per specie». Rimando la trattazione di questo argomento al capitolo seguente. Nel prossimo capitolo ci occuperemo anche di un'altra scuola di biologi i quali, sulla base di ragioni altrettanto inconsistenti, sono stati presentati come antidarwiniani, i cosiddetti «cladisti trasformati». Questi biologi appartengono al campo generale della tassonomia, la scienza della classificazione.

X

L'unico vero albero della vita

Questo libro concerne principalmente l'evoluzione come soluzione del complesso problema del «disegno» che si osserva in natura: l'evoluzione come la vera spiegazione dei fenomeni che secondo Paley dimostravano l'esistenza di un orologiaio divino.

Ecco perché io continuo a insistere qui sugli occhi e sulla ecolocazione. Ma c'è anche un altro gruppo di cose che vengono spiegate dalla teoria dell'evoluzione. Mi riferisco ai fenomeni della diversità: la varietà di diversi tipi animali e vegetali distribuiti in tutto il mondo, e la distribuzione dei caratteri in essi. Benché io sia interessato soprattutto agli occhi e ad altri esempi di meccanismi complessi, non devo trascurare questo altro aspetto del ruolo dell'evoluzione nell'aiutarci a comprendere la natura. Perciò questo capitolo è sulla tassonomia.

La tassonomia è la scienza della classificazione. Per alcuni essa ha una fama immeritata di essere una scienza noiosa, fama dovuta forse a un'associazione subconscia con musei polverosi e con l'odore di formalina, quasi come se venisse confusa con la tassidermia, il complesso delle tecniche usate per la conservazione di parti di vertebrati. In realtà è tutt'altro che noiosa. Per ragioni che non riesco a capire fino in fondo, essa è uno dei campi soggetti alle controversie più acrimoniose nell'intera biologia. La tassonomia interessa a filosofi e a storici e svolge un ruolo importante in tutte le discussioni sull'evoluzione. E dai ranghi dei tassonomisti sono usciti alcuni dei più espliciti fra i moderni biologi che sostengono di essere antidarwiniani.

Benché i tassonomisti studino per lo più animali o piante, possono essere classificate ogni sorta di altre cose: rocce, navi da guerra, i libri di una biblioteca, le stelle, le lingue. Una classificazione ordinata viene spesso rappresentata come un fatto di comodità, come una necessità pratica, e questa è in effetti parte della verità. I libri conservati in una grande biblioteca sono quasi inutili a meno che non vengano organizzati in un qualche modo non casuale, così che i libri su un determinato argomento possano essere reperiti ogni volta che occorrono. La scienza, o forse l'arte, della biblioteconomia è un esercizio di tassonomia applicata. Per lo stesso tipo di ragione, la vita dei biologi risulta molto facilitata dal poter collocare animali e piante in caselle ben precise con un loro nome. Ma dire che questa è l'unica ragione per la tassonomia animale e vegetale significherebbe perdere di vista il punto più importante. Per i biologi evoluzionistici c'è qualcosa di molto speciale nella classificazione degli organismi viventi, qualcosa che non vale per alcun altro tipo di tassonomia. Questo qualcosa segue dall'idea, propria della teoria dell'evoluzione, che esista un solo albero genealogico corretto di tutti gli organismi viventi, e noi possiamo fondare su di esso la nostra tassonomia. Oltre alla sua unicità, questa tassonomia ha la proprietà singolare che io chiamerò «perfetto annidamento» (perfect nesting). Che cosa significhi quest'espressione, e perché sia così importante, è uno fra i temi principali di questo capitolo.

Usiamo la biblioteca come esempio di tassonomia non biologica. Non esiste un'unica soluzione corretta al problema di come si debbano classificare i libri in una biblioteca o in una libreria. Un bibliotecario può dividere la sua collezione di libri nelle seguenti categorie principali: scienza, storia, letteratura, altre arti, opere straniere ecc. Ciascuna di queste sezioni principali della biblioteca dovrebbe presentare a sua volta delle suddivisioni interne. La sezione scientifica potrebbe essere suddivisa in biologia, geologia, chimica, fisica e via dicendo. I libri della sezione di biologia, all'interno della scienza, potrebbero essere suddivisi in scaffali dedicati a fisiologia, anatomia, biochimica, entomologia e via dicendo. Infine, all'interno di ciascuno scaffale, i libri potrebbero essere collocati in ordine alfabetico. Le altre sezioni principali della biblioteca, la sezione di storia, quella di letteratura, quella di opere in lingue straniere e così via, dovrebbero essere suddivise in modo simile. La biblioteca è perciò suddivisa gerarchicamente in modo da dare al lettore la possibilità di rintracciare il libro che cerca. La classificazione gerarchica è utile perché consente al lettore di orientarsi rapidamente nella collezione dei libri. È per lo stesso tipo di ragione che nei dizionari le parole sono in ordine alfabetico.

Non esiste però una gerarchia unica in osservanza della quale debbano essere ordinati i libri in una biblioteca. Un altro bibliotecario potrebbe preferire un tipo di organizzazione diverso, ma ancora gerarchico. Egli potrebbe non prevedere, per esempio, una sezione separata per le opere in lingue straniere, ma suddividere i libri, indipendentemente dalla lingua in cui sono scritti, nelle aree dedicate ai singoli argomenti: i libri di biologia in tedesco andrebbero nella sezione di biologia, i libri di storia in tedesco nella sezione di storia e così via. Un terzo bibliotecario potrebbe adottare il procedimento radicale di sistemare tutti i libri, qualunque sia il loro argomento, nell'ordine cronologico della loro pubblicazione, facendo affidamento su cataloghi a schede (o su equivalenti

computerizzati) per trovare i libri su argomenti desiderati.

Questi tre modi per organizzare una biblioteca sono del tutto diversi l'uno dall'altro, ma funzionerebbero tutti probabilmente in modo adeguato e sarebbero considerati accettabili da molti lettori, anche se non, per inciso, dall'attentato membro di un club di Londra che sentii una volta alla radio criticare il suo club per avere assunto un bibliotecario. La biblioteca era andata avanti per un secolo senza alcuna organizzazione ed egli non vedeva perché si dovesse ora tutt'a un tratto organizzarla. L'intervistatore gli chiese gentilmente come pensava che dovessero essere disposti i libri sugli scaffali. «I più alti a sinistra, i più bassi a destra!» egli rispose senza esitazione. Le librerie popolari ordinano i loro libri in sezioni principali che riflettono le richieste della gente. Anziché essere ordinati nelle sezioni scienza, storia, letteratura, geografia e via dicendo, i loro libri sono raggruppati sotto le etichette giardinaggio, cucina, «libri televisivi», l'occulto; una volta vidi addirittura uno scaffale con la vistosa etichetta religione e ufo.

Non esiste dunque una soluzione «corretta» al problema di come classificare i libri. I bibliotecari sono spesso in disaccordo tra loro sul modo di classificazione, ma fra i criteri con cui si vincono o si perdono le discussioni non ci sono la «verità» o la «correttezza» di un sistema di classificazione rispetto a un altro.

Piuttosto, i criteri che vengono discussi saranno la «comodità per l'utente», la «rapidità con cui si possono trovare i libri» e così via. In questo senso si potrebbe dire che la tassonomia dei libri in una biblioteca è arbitraria. Ciò non implica che non sia importante escogitare un buon sistema di classificazione; tutt'altro.

Quel che significa è che non esiste un singolo sistema di classificazione che, in un mondo di informazione perfetta, possa essere accettato da tutti come l'unica classificazione corretta. La tassonomia degli organismi viventi ha invece, come vedremo, questa proprietà forte che manca alla tassonomia dei libri; o almeno ce l'ha se adottiamo un punto di vista evoluzionistico.

È possibile, ovviamente, escogitare un numero qualsiasi di sistemi per classificare gli organismi, ma mostrerò che tutti quei sistemi tranne uno sono altrettanto arbitrari quanto la classificazione dei libri di una biblioteca. Se si richiede semplicemente la comodità, un conservatore di museo può classificare i suoi esemplari secondo le dimensioni e le condizioni di conservazione: grandi esemplari impagliati; piccoli esemplari essiccati appuntati con spilli su tavolette di sughero in ripiani; quelli in formalina in recipienti di vetro; quelli microscopici su vetrini, e via dicendo. Raggruppamenti ispirati esclusivamente a ragioni di comodo sono comuni nei giardini zoologici. Nello zoo di Londra i rinoceronti sono alloggiati nella «Casa degli elefanti» per la semplice ragione che hanno bisogno dello stesso tipo di gabbie molto robuste. Uno specialista di biologia applicata potrebbe classificare gli animali in dannosi (suddivisi in parassiti di interesse medico, parassiti di interesse agricolo e animali direttamente dannosi in quanto mordono o pungono), benefici (suddivisi in modi simili) e neutri. Un dietologo potrebbe classificare gli animali a seconda del valore nutritivo della loro carne per gli esseri umani, anche in questo caso con una suddivisione complessa di categorie. Una volta mia nonna ricamò un libro di stoffa per bambini sugli animali, che vi venivano classificati a seconda del tipo di zampe. Gli antropologi hanno documentato numerosi sistemi complessi di tassonomia animale usati da tribù in tutto il mondo.

Ma fra tutti i sistemi di classificazione che si potrebbero immaginare, c'è un sistema unico, unico nel senso che possono essergli applicate parole come «corretto» e «scorretto», «vero» e «falso», con perfetto accordo data una perfetta informazione.

Tale sistema unico è quello fondato sui rapporti evolutivi. Per evitare ogni confusione darò a questo sistema il nome che i biologi danno alla sua forma più rigorosa: tassonomia cladistica.

Nella tassonomia cladistica il criterio ultimo per raggruppare assieme gli organismi è il grado di parentela o, in altri termini, l'epoca relativamente recente a cui risale il loro progenitore comune. Gli uccelli, per esempio, si distinguono dai non-uccelli per essere discesi tutti da un progenitore comune, che non è un progenitore di alcun non-uccello. I mammiferi sono discesi tutti da un progenitore comune, che non è un progenitore di alcun nonmammifero. Uccelli e mammiferi hanno un progenitore comune più remoto, che condividono con una quantità di altri animali, come serpenti e sauri e tuatara. Gli animali discesi da questo progenitore comune si chiamano tutti amnioti. Così

gli uccelli e i mammiferi sono amnioti. Secondo i cladisti la parola «rettili» non è un vero termine tassonomico essendo definito per eccezione: sono rettili tutti gli amnioti eccettuati gli uccelli e i mammiferi. In altri termini, il progenitore comune più recente di tutti i «rettili» (serpenti, testudinati ecc.) è anche il progenitore di alcuni non-rettili, e principalmente degli uccelli e dei mammiferi. All'interno della classe dei mammiferi, ratti e topi hanno in comune un progenitore recente; anche leopardi e leoni hanno in comune un progenitore recente; e lo stesso vale per lo scimpanzé e l'uomo. Gli animali strettamente imparentati sono quelli che condividono un progenitore comune recente. Animali imparentati più alla lontana hanno un progenitore comune meno recente. Animali che hanno fra loro un grado di parentela molto basso, come esseri umani e lumache, hanno un progenitore comune molto antico. Due organismi non possono mai essere del tutto senza legami di parentela fra loro, essendo quasi certo che la vita quale la conosciamo abbia avuto origine una sola volta sulla Terra.

La vera tassonomia cladistica è strettamente gerarchica, espressione che userò per significare che può essere rappresentata come un albero i cui rami divergono sempre e non tornano mai a convergere. A mio modo di vedere (alcune scuole di tassonomisti, di cui ci occuperemo più avanti, dissentirebbero) essa è strettamente gerarchica non perché la classificazione gerarchica sia comoda, come la classificazione dei libri di una biblioteca, né perché ogni essere vivente nel mondo rientri naturalmente in una disposizione gerarchica, ma semplicemente perché il meccanismo dell'evoluzione è gerarchico. Una volta che l'albero della vita si sia ramificato oltre una certa distanza minima (che corrisponde fondamentalmente ai confini della specie), i rami non tornano più a incontrarsi (potrebbe esserci qualche rara eccezione, come nell'origine della cellula eucariotica menzionata nel capitolo VII). Gli uccelli e i mammiferi sono discesi da un progenitore comune, ma oggi sono rami separati dell'albero della vita, e non si incontreranno più: non ci sarà mai un ibrido fra un uccello e un mammifero. Un gruppo di organismi che hanno questa proprietà di essere discesi tutti da un progenitore comune, che non sia un progenitore di alcun organismo che non appartenga al gruppo, si chiama clado o clado, da un vocabolo greco che significa «ramo d'albero».

Un altro modo di rappresentare quest'idea di una gerarchia rigorosa è quella nei termini del «perfetto annidamento». Scriviamo i nomi di un qualsiasi insieme di animali su un grande foglio di carta e tracciamo dei cerchi attorno agli insiemi imparentati fra loro. Per esempio, ratto e topo verrebbero a trovarsi all'interno di un unico piccolo cerchio indicante che hanno stretti rapporti di parentela, ossia che hanno un progenitore comune recente. Anche la cavia e l'idrochero sarebbero racchiusi all'interno di un altro piccolo cerchio. Il cerchio ratto-topo e il cerchio cavia-idrochero sarebbero a loro volta uniti fra loro (assieme ai castori e ai porcospini e agli scoiattoli e a numerosi altri animali) in un cerchio più grande etichettato col loro nome: «roditori». Si dice che i cerchi interni sono «annidati» all'interno di cerchi più grandi, più esterni. In qualche altra posizione sul foglio di carta, leone e tigre sarebbero uniti fra loro in un piccolo cerchio. Questo cerchio sarebbe incluso con altri all'interno di un cerchio etichettato «felini». Cani, gatti, donnole, orsi ecc. sarebbero tutti uniti, in una serie di cerchi dentro altri cerchi, in un singolo grande cerchio etichettato «carnivori». Il cerchio dei roditori e il cerchio dei carnivori tenderebbero poi a rientrare in una serie di cerchi più generali all'interno di altri cerchi compresi a loro volta in un cerchio molto grande con l'etichetta «mammiferi».

La cosa importante in questo sistema di cerchi dentro cerchi è che esso è «perfettamente annidato». Mai, neppure in un'unica occasione solitaria, i cerchi da noi disegnati si intersecheranno.

Considerando due cerchi sovrapposti, sarà sempre vero che un cerchio si trova per intero all'interno dell'altro. L'area racchiusa nel cerchio interno sarà abbracciata sempre totalmente da quello esterno: non si danno mai sovrapposizioni parziali. Questa proprietà del perfetto annidamento tassonomico non esiste nelle classificazioni di libri, di lingue, di tipi di suolo o di scuole di pensiero in filosofia. Se un bibliotecario traccia un cerchio attorno ai libri di biologia e un altro attorno ai libri di teologia, egli troverà che spesso i due cerchi si sovrappongono. Nella zona di sovrapposizione si trovano libri con titoli come Biologia e fede cristiana.

In considerazione di ciò, noi potremmo attenderci che la classificazione delle lingue presentasse la proprietà del perfetto annidamento. Le lingue, come abbiamo visto nel capitolo VII, si evolvono in

modo in qualche misura simile a quello degli animali. Le lingue che si sono separate di recente da un progenitore comune, come lo svedese, il norvegese e il danese, sono molto più simili fra loro di quanto non assomiglino a lingue da cui si sono separate molto tempo fa, come l'islandese. Ma le lingue non solo divergono, bensì talvolta si fondono anche fra loro. L'inglese moderno è un ibrido fra lingue germaniche e romanze che si erano separate molto tempo prima, e l'inglese non rientrerebbe perciò in modo perfetto in alcun diagramma di annidamento gerarchico. Si troverebbe infatti che i cerchi che racchiudono l'inglese presenterebbero delle intersezioni, delle sovrapposizioni parziali. I cerchi della classificazione biologica non si intersecano mai in questo modo perché al di sopra del livello delle specie l'evoluzione è sempre divergente.

Tornando all'esempio della biblioteca, nessun bibliotecario può evitare interamente il problema dei libri intermedi o delle sovrapposizioni. Non è di alcuna utilità mettere la biologia e la teologia in due stanze adiacenti e sistemare i libri intermedi nel corridoio che le divide; che cosa dovremmo fare infatti dei libri che sono intermedi fra la biologia e la chimica, fra la fisica e la teologia, fra la storia e la teologia, fra la storia e la biologia? Io penso di essere nel giusto dicendo che il problema delle forme intermedie esiste inevitabilmente, intrinsecamente, in tutti i sistemi tassonomici diversi da quello che deriva dalla biologia evoluzionistica. Parlando a titolo personale, questo è un problema che mi dà un senso di disagio quasi fisico quando affronto i modesti compiti di classificazione che si pongono nella mia vita professionale: sistemazione nei miei scaffali dei miei libri e degli estratti di articoli scientifici che alcuni colleghi (animati dalle intenzioni più gentili) mi mandano; archiviazione di documenti amministrativi; vecchie lettere, e via dicendo. Quali che siano le categorie che si adottano per un sistema di archiviazione, ci sono sempre elementi scomodi che non rientrano perfettamente in nessuna di esse, e la scomodità della decisione mi induce spesso, mi duole dirlo, a lasciare articoli insoliti sulla mia scrivania, a volte anche per anni, finché la cosa più utile è quella di gettarli via. Spesso si fa ricorso, ma con poca soddisfazione, a una categoria «miscellanea», categoria che, una volta iniziata, ha una minacciosa tendenza a crescere in modo ipertrofico. A volte mi chiedo se i bibliotecari, e i conservatori di tutti i musei eccezion fatta per i musei di biologia, non siano per caso particolarmente soggetti a ulcere.

Nella tassonomia degli organismi viventi questi problemi di ordinamento non si pongono. Non esistono animali «miscellanei». Finché restiamo al di sopra del livello delle specie, e finché ci limitiamo a studiare solo animali moderni (o animali in qualsiasi intervallo di tempo dato: vedi sotto) non ci sono forme intermedie scomode. Se un animale sembra essere una forma intermedia scomoda, per esempio se sembra essere esattamente una forma intermedia fra un mammifero e un uccello, un evoluzionista può attendersi con fiducia che esso debba essere certamente una cosa o l'altra. L'apparenza del possesso di caratteri intermedi dev'essere un'illusione. L'infelice bibliotecario non può beneficiare di tale sicurezza. È perfettamente possibile che un libro appartenga simultaneamente sia alla sezione di storia sia a quella di teologia. I biologi inclini alla cladistica non indulgono mai nei ragionamenti propri dei bibliotecari sulla «comodità» di classificare le balene come mammiferi o come pesci, o come forme intermedie fra mammiferi e pesci. L'unico argomento che abbiamo in proposito è un argomento fattuale. In questo caso i fatti conducono tutti i biologi moderni alla stessa conclusione. Le balene sono mammiferi e non pesci e non sono una forma intermedia, neppure in piccola misura. Esse non sono più vicine ai pesci di quanto lo siano gli esseri umani, o gli ornitorinchi, o un qualsiasi altro mammifero.

È in effetti importante capire che tutti i mammiferi - gli esseri umani, i cetacei, gli ornitorinchi e tutti gli altri - sono esattamente altrettanto lontani dai pesci, giacché tutti i mammiferi sono connessi ai pesci attraverso lo stesso progenitore comune. Il mito che tutti i mammiferi, per esempio, formino una «scala», e che i mammiferi «inferiori» siano più vicini ai pesci di quelli «superiori», è una forma di snobismo che non deve nulla all'evoluzione. È un'antica nozione pre-evoluzionistica, chiamata talvolta la «grande catena dell'essere», che avrebbe dovuto essere distrutta dall'evoluzione ma che, misteriosamente, è entrata a far parte del modo in cui molte persone pensano sull'evoluzione.

A questo punto non posso fare a meno di richiamare l'attenzione sull'ironia insita nella sfida che i creazionisti sono ansiosi di lanciare agli evoluzionisti: «Producete le vostre forme intermedie. Se

l'evoluzione fosse vera, dovrebbero esistere animali intermedi fra un cane e un gatto, o fra una rana e un elefante.

Ma qualcuno ha mai visto un ranafante?». Io ho ricevuto opuscoli di creazionisti che tentano di gettare il ridicolo sull'evoluzione con disegni di grottesche chimere, per esempio con quarti posteriori di cavallo impiantati sulla parte anteriore di un cane.

Gli autori sembrano immaginare che gli evoluzionisti dovrebbero attendersi l'esistenza di tali animali intermedi. Questa posizione non solo fraintende il nocciolo centrale dell'evoluzione ma ne è l'esatta antitesi. Una delle attese più forti che la teoria dell'evoluzione ci dà è che forme intermedie di tal genere non dovrebbero esistere. Questo è il punto centrale del mio confronto fra gli animali e i libri di una biblioteca.

La tassonomia di esseri viventi evoluti ha quindi la proprietà unica di fornire, in un mondo di perfetta informazione, un accordo perfetto. È questo ciò che intendo dire quando affermo che parole come «vero» e «falso» possono essere applicate ad affermazioni nell'ambito della tassonomia cladistica ma non ad affermazioni nell'ambito della tassonomia applicata ai libri di una biblioteca. Dobbiamo fare due precisazioni. In primo luogo, nel mondo reale non abbiamo mai un'informazione perfetta. I biologi possono essere in disaccordo fra loro su fatti di discendenza, e le dispute possono essere difficili da comporre a causa delle imperfezioni dell'informazione: per esempio a causa del numero insufficiente di fossili disponibili. Tornerò più avanti su questo punto. In secondo luogo, nel caso che si disponga di troppi fossili si pone un diverso tipo di problema. La nettezza della classificazione potrebbe venir meno se cercassimo di includere in essa non solo gli animali moderni ma tutti gli animali che sono vissuti in qualche periodo in passato. Questo perché, per quanto due animali moderni - per esempio un uccello e un mammifero - possono essere lontani fra loro, hanno pur avuto, nel corso del tempo, un progenitore comune. Se affrontiamo il compito di inserire quel progenitore nella nostra classificazione moderna, potremmo avere dei problemi. Nel momento in cui cominciamo a considerare animali estinti, non è più vero che non ci siano forme intermedie. Al contrario, ora abbiamo a che fare con serie potenzialmente continue di forme intermedie. La distinzione fra uccelli moderni e mammiferi moderni non simili agli uccelli è una distinzione netta solo perché le forme intermedie convergenti all'indietro verso il progenitore comune sono tutte estinte. Per inculcare in modo più efficace questa nozione, pensiamo di nuovo a un'ipotetica natura «gentile» che ci fornisca una documentazione fossile completa, un fossile per ogni animale che sia mai esistito. Quando introdussi questa fantasia nel capitolo precedente, menzionai il fatto che, da un certo punto di vista, sarebbe preferibile che la natura fosse in realtà scortese. Pensavo allora alla fatica di studiare e descrivere tutti i fossili, ma ora giungiamo a un altro aspetto di questa paradossale scortesia. Una documentazione fossile completa ci renderebbe molto difficile la classificazione degli animali in gruppi discreti etichettabili con nomi precisi. Se possedessimo una documentazione fossile completa, dovremmo rinunciare a nomi discreti e dovremmo far ricorso a una qualche notazione matematica o grafica di scale slittanti. La mente umana preferisce di gran lunga nomi discreti, cosicché in un certo senso è un vantaggio che la documentazione fossile sia lacunosa.

Se consideriamo tutti gli animali che siano mai esistiti, anziché solo gli animali moderni, parole come «uomo» e «uccello» diventano altrettanto confuse e sfocate al loro contorno quanto parole come «alto» e «grasso». Gli zoologi possono discutere senza fine sul problema se un particolare fossile sia o no un uccello. In verità essi discutono spesso proprio su questo problema a proposito del ramoso fossile *Archaeopteryx*. Risulta che se la distinzione «uccello-non uccello» è una distinzione più chiara di quella fra «alto-basso» è solo perché, nel caso dell'alternativa uccello-non uccello, le scomode forme intermedie sono tutte estinte. Se una malattia curiosamente selettiva uccidesse tutte le persone di statura intermedia, le parole «alto» e «basso» verrebbero ad assumere un significato altrettanto preciso di «uccello» o «mammifero».

Ma non è solo la classificazione geologica a essere salvata da una scomoda ambiguità grazie al fatto opportuno che la maggior parte delle forme intermedie sono oggi estinte. Lo stesso vale anche per l'etica e il diritto umani. I nostri sistemi legale e morale sono profondamente legati alla nostra specie. Il direttore di uno zoo è legalmente autorizzato a «sopprimere» uno scimpanzé in eccesso

rispetto al fabbisogno dello zoo, mentre se qualcuno suggerisse che egli ha la medesima autorizzazione a sopprimere un inserviente o un bigliettaio in eccesso provocherebbe urla di incredula indignazione. Lo scimpanzè è di proprietà dello zoo. Gli esseri umani non sono considerati proprietà di nessuno; eppure la ragione per questa discriminazione fra uomo e scimpanzè viene di rado enunciata esplicitamente, e io ho dei dubbi che in effetti esista una ragione sostenibile. È così forte il pregiudizio a favore della nostra specie, ispirato dai nostri atteggiamenti cristiani, che l'aborto di un singolo zigote umano (la maggior parte di questi sono comunque destinati all'aborto spontaneo) può suscitare più preoccupazioni morali e più giusta indignazione della vivisezione di un numero qualsiasi di intelligenti scimpanzè adulti! Io ho avuto modo di udire scienziati rispettabili, liberali, i quali non avevano alcuna intenzione di tagliare veramente a pezzi degli scimpanzè vivi, difendere nondimeno in modo appassionato il loro diritto a farlo se lo avessero voluto, senza alcuna interferenza da parte della legge. Tali persone sono spesso le prime a insorgere alla minima violazione dei diritti umani. Se noi possiamo accettare senza disagio l'applicazione di norme tanto discriminatorie è grazie alla sola ragione che tutte le forme intermedie fra esseri umani e scimpanzè sono estinte.

L'ultimo comune antenato fra esseri umani e scimpanzè visse forse solo cinque milioni di anni fa, un tempo decisamente più recente di quello in cui visse l'ultimo progenitore comune di scimpanzè e orang-utan, e fu di forse 30 milioni di anni posteriore al progenitore comune di scimpanzè e scimmie cinomorfe.

Gli scimpanzè e noi condividiamo più del 99 per cento dei nostri geni. Se, in varie isole dimenticate in tutto il mondo, venissero scoperti superstiti di tutte le forme intermedie fino al progenitore comune fra scimpanzè ed esseri umani, chi può dubitare delle profonde ripercussioni che questo fatto eserciterebbe inevitabilmente sulle nostre leggi e sulle nostre convenzioni morali, tanto più che lungo l'intero ambito di variazione non mancherebbero casi di incrocio? O si dovrebbero garantire pieni diritti umani agli esseri compresi nell'intero ambito di variazione (diritto di voto agli scimpanzè) oppure si dovrebbe istituire un complesso sistema di leggi discriminatorie simile all'apartheid, con tribunali che dovrebbero decidere in certi casi particolari se determinati individui fossero legalmente «scimpanzè» o «esseri umani»; e alcuni genitori umani sarebbero preoccupati per il desiderio delle loro figlie di sposare uno di «quelli». Io suppongo che il mondo sia già troppo ben esplorato per consentirci di sperare che un giorno questa fantasia autopunitiva possa mai avverarsi. Ma chiunque pensi che ci sia qualcosa di ovvio e di evidente nei «diritti umani» dovrebbe riflettere che è solo per una mera fortuna se queste scomode forme intermedie non sono sopravvissute. Alternativamente, se gli scimpanzè non fossero stati scoperti finora, essi potrebbero forse oggi essere considerati come una tale imbarazzante forma intermedia.

Chi ha letto il capitolo precedente potrebbe osservare che l'intero ragionamento, che le categorie perdano la loro precisione se non ci atteniamo ai soli animali contemporanei, dà per scontato che l'evoluzione proceda a una velocità costante piuttosto che essere «punteggiata», ossia inframmezzata da periodi di stasi.

Quanto più la nostra concezione dell'evoluzione si approssima all'estremo di un movimento uniforme, continuo, tanto più saremo pessimisti sulla possibilità stessa di applicare categorie come uccello e non-uccello, umano o non-umano, a tutti gli animali vissuti in passato. Un saltazionista estremo potrebbe credere che ci sia stato realmente un primo essere umano, il cui cervello mutante aveva un volume doppio di quello di suo padre e di quello di suo fratello, ancora simile a uno scimpanzè.

I fautori degli equilibri punteggiati non sono per lo più, come abbiamo visto, dei veri macroevoluzionisti. Il problema dell'ambiguità delle etichette tassonomiche è destinato comunque a sembrare meno grave per loro che per coloro che credono in un'evoluzione più continua. Il problema dei nomi sorgerebbe però persino per i punteggiati se fosse vero letteralmente che ogni animale vissuto in passato si fosse conservato come fossile, giacché, quando si scende ai particolari, i punteggiati sono in realtà dei gradualisti. Poiché però essi ritengono particolarmente improbabile il ritrovamento di fossili in grado di documentare brevi periodi di rapida transizione, mentre è particolarmente comune trovare fossili che documentino i lunghi periodi di stasi, il

«problema dei nomi» sarà meno grave in una concezione puntuazionistica che in una concezione non puntuazionistica dell'evoluzione.

È per questa ragione che i puntuazionisti, e specialmente Niles Eldredge, attribuiscono una grande importanza a trattare «la specie» come un'«entità» reale. Per un non puntuazionista, «la specie» è definibile solo grazie al fatto che le scomode forme intermedie sono estinte. Un antipuntuazionista estremo, prendendo in considerazione la storia dell'evoluzione nella sua interezza, non riesce a vedere nella «specie» un'entità discreta. Egli può percepire solo un continuo confuso. Nella sua concezione una specie non ha mai un inizio chiaramente definito, e solo qualche volta ha una fine ben precisa (estinzione); spesso una specie non ha una fine definita in modo netto ma si trasforma gradualmente in una nuova specie. Un puntuazionista, d'altro canto, vede una specie originarsi in un tempo particolare (a rigore si ha un periodo di transizione della durata di decine di migliaia di anni, ma questa durata è breve a una scala geologica). Inoltre, una specie ha ai suoi occhi una fine definita, o almeno una fine che si compie rapidamente, e non una transizione sfumata e graduale in una nuova specie. Poiché la maggior parte della vita di una specie, dal punto di vista puntuazionistico, viene trascorsa in periodi di stasi immutabile, e poiché una specie ha un inizio e una fine discreti, ne segue che, per un puntuazionista, si può dire che una specie abbia una «durata di vita» definita, misurabile. Il non puntuazionista non attribuirebbe a una specie una «durata di vita» come a un singolo organismo. L'antipuntuazionista estremo vede nella «specie» una delimitazione arbitraria di un fiume che scorre in modo continuo, senza che ci sia una particolare ragione per tracciare linee che ne delimitino l'inizio e la fine.

In un libro di un puntuazionista sulla storia di un gruppo di animali, per esempio sulla storia dei cavalli negli ultimi 30 milioni di anni, tutti i protagonisti possono essere specie anziché singoli organismi, poiché il puntuazionista vede nelle specie delle «cose» reali, con una loro propria identità discreta. Le specie arriveranno d'improvviso sulla scena, e d'improvviso spariranno, sostituite da nuove specie. Sarà una storia di successioni, giacché una specie sarà sostituita da un'altra. Se la stessa storia venisse scritta da un antipuntuazionista, questi userebbe i nomi di specie solo per comodità. Quando il suo sguardo spazierà longitudinalmente lungo il corso del tempo, egli cesserà di vedere nelle specie delle unità discrete. I veri protagonisti nella sua storia saranno i singoli organismi in popolazioni soggette al mutamento. Nel suo libro saranno i singoli animali a cedere il passo ad altri singoli animali loro discendenti e non specie a cedere il passo ad altre specie. Non sorprende, quindi, che i puntuazionisti tendano a credere in una sorta di selezione naturale al livello delle specie, che essi considerano analoga alla selezione darwiniana al comune livello individuale. I non puntuazionisti saranno invece inclini a vedere operare l'evoluzione a un livello non superiore a quello del singolo organismo. L'idea di una «selezione a livello di specie» ha per loro meno attrattiva, poiché essi non pensano alle specie come a entità con un'esistenza discreta nel tempo geologico.

Questo è un momento opportuno per occuparci dell'ipotesi della selezione a livello di specie, che è stata rimandata qui, in un certo senso, dal capitolo precedente. Io non spenderò molto tempo su di essa, avendo già espresso nel libro *Il fenotipo esteso* i miei dubbi sulla presunta importanza che essa rivestirebbe nell'evoluzione. È vero che la grande maggioranza delle specie vissute fino a oggi si sono estinte. È vero anche che nuove specie vengono all'esistenza con un ritmo che quanto meno controbilancia il ritmo di estinzione, cosicché c'è una sorta di «pool di specie» la cui composizione muta di continuo. L'ingresso non casuale di nuove specie nel pool e l'eliminazione non casuale di specie che ne fanno parte potrebbero, è vero, costituire teoricamente una sorta di selezione naturale di livello superiore. Può darsi che certe caratteristiche delle specie influiscano sulla loro probabilità di estinguersi, o di produrre per gemmazione nuove specie. Le specie che noi vediamo nel mondo tenderanno ad avere ciò che si richiede per venire al mondo e ciò che si richiede per non estinguersi. Volendo si può chiamare questo fenomeno una sorta di selezione naturale, anche se io sospetto che sia più vicino alla selezione per passi singoli che non alla selezione cumulativa. Sono invece scettico circa la possibilità che questa sorta di selezione possa avere una grande importanza nello spiegare l'evoluzione.

Questo scetticismo potrebbe riflettere solo i miei preconconcetti su ciò che è importante. Come ho detto

all'inizio di questo capitolo, quel che io mi attendo soprattutto da una teoria dell'evoluzione è che essa spieghi i meccanismi complessi, ben progettati, come la testa, le mani, gli occhi e l'ecolocazione. Nessuno, neppure il più ardente fautore della selezione a livello di specie, pensa che questa possa fornire una tale spiegazione. Alcuni pensano che la selezione a livello di specie possa spiegare certe tendenze a lungo termine riscontrate nella documentazione fossile, come la tendenza osservata piuttosto comunemente verso corpi di maggiori dimensioni al passare del tempo. I cavalli moderni, come abbiamo visto, sono più grandi dei loro progenitori di 30 milioni di anni fa. I fautori della selezione a livello di specie avanzano obiezioni all'idea che ciò si sia verificato attraverso un costante vantaggio individuale: essi non vedono nelle tendenze dei fossili l'indicazione che i singoli cavalli di mole maggiore fossero costantemente favoriti rispetto a singoli cavalli di mole minore all'interno della loro specie. Essi pensano invece che sia accaduto questo: c'erano quantità di specie, un pool di specie. In alcune di queste specie la mole corporea media era grande, in altre era piccola (forse perché in alcune specie avevano maggior successo gli individui più grandi, in altre quelli più piccoli). Le specie di mole corporea maggiore erano meno esposte al rischio di estinzione (o avevano maggiori probabilità di dare origine «per gemmazione» a nuove specie simili a se stesse) rispetto alle specie di mole minore. Qualsiasi cosa possa essere accaduta all'interno delle specie, secondo il fautore della selezione a livello di specie, la tendenza riscontrata nei fossili verso una mole corporea maggiore fu dovuta a una successione di specie dalla mole corporea media progressivamente maggiore. Può darsi persino che, nella maggioranza delle specie, fossero favoriti individui più piccoli; eppure la tendenza dei fossili continuava a essere verso una mole corporea maggiore. In altri termini, la selezione a livello di specie poteva privilegiare la minoranza di specie in cui erano favoriti gli individui di mole maggiore. Esattamente questa tesi fu sostenuta dal grande teorico neodarwiniano George C. Williams - il quale ammise di svolgere in quell'occasione la parte di avvocato del diavolo -, molto tempo prima che venisse in scena la moderna teoria della selezione a livello di specie.

Si potrebbe affermare che noi abbiamo qui, e forse in tutti gli esempi addotti di selezione a livello di specie, non tanto una tendenza evolutiva quanto una tendenza successionale, come quella verso piante sempre più alte quando un'estensione di terreno incolto viene colonizzata successivamente da piccole erbacce, da grandi piante erbacee, da arbusti e, infine, dagli alberi maturi «a climax» della foresta. In ogni modo, sia che si parli di una tendenza successionale o di una tendenza evolutiva, i fautori della selezione a livello di specie potrebbero ben aver ragione a credere che sia a questo tipo di tendenza che essi, come paleontologi, si trovano spesso di fronte in strati successivi della documentazione fossile. Ma, come ho detto, nessuno intende sostenere che la selezione a livello di specie sia una spiegazione importante per l'evoluzione di adattamenti complessi. Ed ecco perché. Gli adattamenti complessi non sono, nella maggior parte dei casi, proprietà di specie, bensì proprietà di individui. Le specie non hanno occhi né un cuore, mentre li hanno gli individui che ne fanno parte. Se una specie si estingue a causa di una vista cattiva, ciò significa presumibilmente che ogni individuo di quella specie è morto a causa di una vista cattiva. La vista è una proprietà di animali individuali. Quali tipi di caratteri si può dire che siano posseduti da una specie? La risposta dev'essere: i caratteri che incidono sulla sopravvivenza e sulla riproduzione delle specie, in modi che non possono ridursi alla somma dei loro effetti sulla sopravvivenza e sulla riproduzione individuale.

Nell'esempio ipotetico dei cavalli, ho suggerito la possibilità che la minoranza di specie in cui erano favoriti gli individui più grandi avesse meno probabilità di estinguersi rispetto alla maggioranza di specie in cui erano favoriti gli individui più piccoli.

Questo ragionamento non è però affatto convincente. È difficile pensare a ragioni per cui la capacità di sopravvivenza di specie dovrebbe essere dissociata dalla somma delle capacità di sopravvivenza dei singoli individui a esse appartenenti.

Un esempio migliore di un carattere al livello di specie è il seguente esempio ipotetico. Supponiamo che in alcune specie tutti gli individui si procurino i mezzi di sussistenza nello stesso modo.

Tutti i koala, per esempio, vivono su alberi di eucalipto e mangiano solo foglie di eucalipto. Specie come questa possono essere chiamate uniformi. Un'altra specie può contenere una varietà di

individui che si procurano i mezzi di sussistenza in modi diversi.

Ogni individuo potrebbe essere altrettanto specializzato quanto un singolo koala, ma la specie nel suo complesso potrebbe contenere una varietà di abitudini dietetiche. Alcuni membri della specie non mangiano altro che foglie di eucalipto; altri nient'altro che frumento; altri nient'altro che igname; altri nient'altro che buccia di limetta, e via dicendo. Chiamiamo questo secondo tipo di specie una specie variegata. Ora, io penso che sia facile immaginare circostanze nelle quali una specie uniforme sia più soggetta a estinguersi della specie variegata. I koala dipendono totalmente dalla disponibilità di eucalipto, e una malattia dell'eucalipto analoga alla moria dell'olmo li condannerebbe all'estinzione. Nella specie variegata, invece, alcuni membri della specie sopravviverebbero a qualsiasi particolare malattia delle piante di cui si cibano, e la specie potrebbe continuare a sopravvivere. È facile anche credere che la specie variegata abbia maggiori possibilità di produrre nuove specie figlie rispetto alla specie uniforme. Questi potrebbero forse essere veri esempi di selezione a livello di specie.

Diversamente dalla miopia o dal fatto di possedere gambe lunghe, l'«uniformità» o «variegatezza» sono veri caratteri a livello di specie. Il guaio è che gli esempi di tali caratteri a livello di specie sono pochi e rari.

Esiste un'interessante teoria dell'evoluzionista americano Egbert Leigh che può essere interpretata come un possibile esempio di vera selezione a livello di specie, anche se fu suggerita prima che l'espressione «selezione a livello di specie» venisse di moda. Leigh era interessato a quel perenne problema che è l'evoluzione di un comportamento «altruistico» negli individui.

Egli riconobbe correttamente che, se gli interessi individuali entrano in conflitto con quelli della specie, devono prevalere gli interessi individuali (interessi a breve termine). Nulla, a quanto pare, può impedire la marcia di geni egoisti. Ma Leigh fece il seguente interessante suggerimento.

Devono esserci alcuni gruppi o specie in cui ciò che è meglio per l'individuo coincide con ciò che è meglio per la specie. E devono esserci altre specie in cui gli interessi dell'individuo si trovano a divergere in modo molto pronunciato dagli interessi della specie. A parità di tutto il resto, il secondo tipo di specie potrebbe avere minori probabilità di sopravvivere. Una forma di selezione a livello di specie, quindi, potrebbe favorire, non il sacrificio di sé individuale, ma quelle specie in cui agli individui non si chiede di sacrificare il proprio benessere. Potremmo quindi assistere all'evolversi di un comportamento individuale apparentemente altruistico, perché la selezione a livello di specie ha favorito quelle specie in cui l'interesse degli individui è meglio servito dal loro apparente altruismo. L'esempio forse più vistoso di un carattere veramente a livello di specie concerne il modo di riproduzione sessuale in contrapposizione a quello asessuale. Per ragioni che non posso esaminare qui, l'esistenza della riproduzione sessuale pone un grande rompicapo teorico ai darwiniani. Molti anni fa R.A. Fisher, che di solito era ostile a ogni idea di selezione a livelli superiori a quello dell'organismo individuale, fu disposto a fare un'eccezione per il caso speciale della sessualità stessa. Le specie che si riproducono sessualmente, sostenne, per motivi che ancora una volta rinuncio a illustrare (essi non sono così ovvi come ci si potrebbe attendere), sono capaci di evolversi più rapidamente di quelle che praticano la riproduzione asessuale. L'evoluzione è un processo che riguarda le specie, non i singoli organismi: non si può parlare di evoluzione di un organismo. Fisher suggeriva, quindi, che la selezione a livello di specie è in parte responsabile del fatto che la riproduzione sessuale sia così comune fra gli animali moderni. Ma, se è così, quello di cui stiamo occupandoci è un caso di selezione a passi singoli, non di selezione cumulativa.

Secondo questo ragionamento le specie asessuali, quando esistono, tendono a estinguersi perché non si evolvono abbastanza in fretta da tenere il passo con i mutamenti dell'ambiente. Le specie che praticano la riproduzione sessuale non manifestano invece la tendenza all'estinzione perché sono in grado di evolversi abbastanza rapidamente da adeguarsi ai mutamenti ambientali.

Quelle che vediamo attorno a noi sono quindi, per lo più, specie sessuali. Ma l'«evoluzione» che presenta un ritmo variabile fra i due sistemi è, ovviamente, la comune evoluzione darwiniana per selezione cumulativa al livello individuale. La selezione a livello di specie è invece una semplice selezione per passi singoli, la quale sceglie fra due soli caratteri, asessualità e sessualità, evoluzione lenta ed evoluzione veloce. Il meccanismo della sessualità, degli organi di sesso, del

comportamento sessuale, il meccanismo cellulare della divisione cellulare sessuale, tutti questi caratteri devono essere creati dalla selezione cumulativa darwiniana standard, di basso livello, non dalla selezione a livello di specie. In ogni caso, oggi quasi tutti gli studiosi sono contrari alla vecchia teoria che la sessualità sia conservata da una qualche sorta di selezione a livello di gruppo o a livello di specie.

Per concludere la discussione della selezione a livello di specie, questa potrebbe spiegare il tipo di specie esistenti nel mondo in un qualsiasi periodo particolare. Ne segue che potrebbe spiegare anche il mutare dei tipi di specie fra un'epoca geologica e un'altra, ossia il mutare di tipi nella documentazione fossile. Essa non è però una forza significativa nell'evoluzione del complesso meccanismo della vita. Il più che essa possa fare è scegliere fra vari meccanismi complessi alternativi, una volta che tali meccanismi complessi siano già stati creati dalla vera selezione darwiniana. Come ho già detto prima, la selezione a livello di specie può sì aver luogo ma non pare che faccia molto! Torneremo ora all'argomento della tassonomia e dei suoi metodi.

Ho detto che la tassonomia cladistica ha, rispetto ai tipi di tassonomia dei bibliotecari, il vantaggio che in natura esiste un unico autentico modello gerarchico di annidamento che attende di essere scoperto. Tutto quel che dobbiamo fare è sviluppare metodi per scoprirlo. Purtroppo ci sono delle difficoltà pratiche.

Lo spauracchio più interessante del tassonomista è la convergenza evolutiva. Questo è un fenomeno così importante che io gli ho già dedicato mezzo capitolo. Nel capitolo IV abbiamo visto come siano stati trovati ripetutamente animali che assomigliano a specie di altre parti del mondo, con le quali non hanno alcun rapporto di parentela, solo perché hanno stili di vita simili. Le formiche legionarie del Nuovo Mondo assomigliano alle formiche scacciatrici del Vecchio Mondo. Strane somiglianze si sono evolute fra pesci elettrici privi di alcun rapporto di parentela fra loro dell'Africa e del Sudamerica, e fra i veri lupi e il «lupo» marsupiale tilacino della Tasmania. In tutti questi casi io ho affermato semplicemente, senza dare alcuna giustificazione, che queste somiglianze erano convergenti: che si erano evolute indipendentemente in animali privi di rapporti di parentela fra loro. Ma come sappiamo che questi animali non sono imparentati? Se i tassonomisti usano la somiglianza per misurare il grado dei rapporti di parentela, perché non sono stati ingannati dalle somiglianze così strette che sembrano unire tali coppie di animali? O, per dare al problema una forma più assillante, quando i tassonomisti ci dicono che due animali - per esempio il coniglio e la lepre - hanno fra loro un grado di parentela veramente stretto, come facciamo a sapere che non sono stati tratti in inganno da una massiccia convergenza?

Questo è un problema davvero assillante, poiché la storia della tassonomia abbonda di casi in cui tassonomisti posteriori hanno accusato i loro predecessori di avere commesso errori proprio per tale ragione. Nel capitolo IV abbiamo accennato al caso del tassonomista argentino che aveva visto nei liptoterni i progenitori degli equini, mentre oggi si pensa che si tratti di una semplice convergenza. Per molto tempo si ritenne che il porcospino africano fosse strettamente imparentato con i porcospini americani, ma oggi si pensa che i due gruppi abbiano sviluppato indipendentemente il loro rivestimento spinoso. È presumibile che gli aculei siano stati utili per ragioni simili in entrambi i continenti. Chi può dire se le future generazioni di tassonomisti non cambieranno di nuovo idea?

Quale fiducia possiamo avere nella tassonomia, se l'evoluzione convergente è una creatrice così feconda di somiglianze ingannevoli? La ragione principale per cui io personalmente propendo per l'ottimismo è l'avvento sulla scena di potenti tecniche nuove fondate sulla biologia molecolare. Per ricapitolare quanto abbiamo già visto in capitoli precedenti, tutti gli animali e le piante e i batteri, per quanto diversi possono apparire fra loro, sono sorprendentemente uniformi quando scendiamo ai loro componenti molecolari. Questo fatto appare evidente soprattutto nel codice genetico stesso. Il dizionario genetico comprende 64 parole di dna (o codoni) di tre lettere ciascuna. Ognuno di questi codoni ha una precisa traduzione nel linguaggio delle proteine (corrispondendo a un particolare amminoacido o a un punto fermo). Questo linguaggio appare arbitrario nello stesso senso in cui è arbitraria una lingua umana (non c'è niente di intrinseco, per esempio, nel suono della parola «casa», che suggerisce all'ascoltatore ogni attributo di un'abitazione). Dato questo, è un fatto di grande importanza che ogni essere vivente, per quanto possa essere diverso da altri nel suo

aspetto esterno, «parli» quasi esattamente la stessa lingua al livello dei geni. Il codice genetico è universale. Io considero questa una prova quasi conclusiva del fatto che tutti gli organismi sono discesi da un singolo progenitore comune. Le probabilità che lo stesso dizionario di «significati» arbitrari possa avere origine due volte sono quasi inimmaginabilmente piccole. Come abbiamo visto nel capitolo VI, un tempo potrebbero essere esistiti altri organismi che usavano un linguaggio genetico diverso, ma comunque oggi non esistono più. Tutti gli organismi oggi esistenti sono discesi da un singolo progenitore da cui hanno ereditato un dizionario genetico quasi identico, anche se arbitrario, un dizionario identico in quasi tutte le sue 64 parole di dna.

Pensiamo solo all'incidenza di questo fatto sulla tassonomia.

Prima dell'epoca della biologia molecolare gli zoologi potevano essere abbastanza sicuri solo del rapporto di parentela di animali che condividevano un gran numero di caratteri anatomici. La biologia molecolare dischiuse d'improvviso una nuova cassa del tesoro di somiglianze da aggiungere alla magra lista offerta dall'anatomia e dall'embriologia. Le 64 identità (somiglianze è una parola troppo debole) del dizionario genetico condiviso sono solo il punto d'avvio. La tassonomia è stata trasformata. Quelli che un tempo erano solo vaghi indizi di parentela sono diventati oggi quasi certezze statistiche.

L'universalità quasi completa, parola per parola, del dizionario genetico è troppa grazia per il tassonomista. Dopo averci detto che tutti gli esseri viventi hanno rapporti di parentela fra loro, non ci consente infatti di stabilire una precisa gerarchia in tali rapporti. Possono però tornarci utili, a questo scopo, altri tipi di informazione molecolare, giacché noi troviamo qui non una totale identità bensì gradi di somiglianza variabili. I prodotti del meccanismo di traduzione genetica, lo ricordiamo, sono molecole di proteine. Ogni molecola proteica è una frase, una catena di parole, tratte dal dizionario, costituite da amminoacidi. Noi possiamo leggere queste frasi o nella loro traduzione in proteine o nella forma originaria nel dna. Benché tutti gli esseri viventi condividano lo stesso dizionario, non compongono però con le parole da esso tratte le stesse frasi. Questo fatto ci offre l'opportunità di accertare vari gradi di parentela. Le frasi formate da proteine, pur essendo diverse nei particolari, sono spesso simili fra loro nella forma complessiva. Per ogni coppia di organismi possiamo sempre trovare frasi abbastanza simili da risultare versioni leggermente alterate della stessa frase ancestrale. Abbiamo già visto un esempio in proposito nelle piccole differenze fra le sequenze di istoni di bovini e piselli.

Oggi i tassonomisti sono in grado di confrontare frasi molecolari esattamente nello stesso modo in cui possono comparare crani o ossa di gambe. Si può supporre che frasi costituite da proteine o da tratti di dna molto simili appartengano a parenti stretti, mentre frasi meno simili indichino rapporti di parentela più lontani. Queste frasi sono costruite tutte a partire dal dizionario universale di non più di 64 parole (codoni). La bellezza della biologia molecolare moderna consiste nel fatto che possiamo misurare esattamente la differenza fra due animali, come il numero preciso di parole in cui la loro versione di una frase particolare differisce. Nei termini dell'iperspazio genetico del capitolo III, noi possiamo misurare esattamente quanti passi separano un animale da un altro, almeno rispetto a una particolare molecola proteica.

Un altro vantaggio offerto dall'uso di sequenze molecolari in tassonomia consiste nel fatto che, secondo una scuola influente di genetisti, i «neutralisti» (li incontreremo ancora nel capitolo seguente), la maggior parte del mutamento evolutivo al livello molecolare è neutro. Ciò significa che esso non è dovuto alla selezione naturale, ma è in realtà casuale e perciò che, tranne che in occasionali casi sfortunati, il tassonomista non corre il rischio di essere sviato dallo spauracchio della convergenza.

Un fatto connesso è che, come abbiamo già visto, anche in gruppi di animali molto diversi fra loro qualsiasi tipo di molecola sembra evolversi a un ritmo press'a poco costante. Ciò significa che il numero di differenze fra molecole comparabili in due animali, per esempio fra il citocromo umano e il citocromo del facocero, è una buona misura del tempo trascorso dall'epoca in cui visse il loro comune progenitore. Abbiamo dunque un «orologio molecolare» abbastanza preciso. L'orologio molecolare ci consente di stimare non solo quali paia di animali siano più strettamente imparentate, ma anche, approssimativamente, quando vissero i loro progenitori comuni.

Il lettore potrebbe essere incuriosito, a questo punto, da un'apparente contraddizione. In tutto il libro abbiamo sottolineato l'importanza suprema della selezione naturale. Come possiamo dunque ora insistere tanto sulla casualità del mutamento evolutivo al livello molecolare? Per anticipare quanto diremo nel capitolo XI, non esiste in realtà alcuna contraddizione rispetto all'evoluzione degli adattamenti, che sono l'argomento principale di questo libro. Neppure il neutralista più acceso può pensare che organi dal funzionamento complesso come occhi e mani si siano evoluti in virtù di mutamenti casuali. Qualsiasi biologo in possesso delle sue facoltà mentali ammetterà che tali organi possono essersi evoluti solo per opera della selezione naturale. Solo che il neutralista pensa - giustamente, a mio parere - che tali adattamenti sono la punta di un iceberg: probabilmente la massima parte del mutamento evolutivo, vista al livello molecolare, è non funzionale.

Nei limiti in cui l'orologio molecolare è un fatto - e pare sia vero che ciascun tipo di molecola muti al suo ritmo grosso modo caratteristico per milioni di anni - possiamo usarlo per datare i punti di ramificazione nell'albero filogenetico. E se è realmente vero che la maggior parte del mutamento evolutivo, al livello molecolare, è neutra, questo è un dono meraviglioso per il tassonomista. Esso permette infatti di spazzare via con l'arma della statistica il problema della convergenza. Ogni animale ha, scritti nelle sue cellule, grandi volumi di testo genetico, testo che per la maggior parte, secondo la teoria dei neutralisti, non ha alcuna funzione al fine dell'adattamento dell'animale al suo modo di vita peculiare; il testo è in gran parte sottratto alla selezione e non è soggetto all'evoluzione convergente se non in conseguenza del mero caso. La probabilità che due grandi frammenti di testo selettivamente neutri possano assomigliarsi per caso può essere calcolata, ed è in effetti molto bassa. Fatto ancor più importante, il ritmo costante dell'evoluzione molecolare ci consente realmente di datare i punti di ramificazione nella storia filogenetica.

È difficile sopravvalutare l'importanza del nuovo strumento aggiunto all'armamentario del tassonomista dalle moderne tecniche di lettura di sequenze molecolari. Ovviamente non tutte le frasi molecolari in tutti gli animali sono state ancora decifrate, ma si può già entrare in biblioteca e cercare la fraseologia esatta parola per parola, lettera per lettera, diciamo, delle frasi dell'emoglobina di un cane, di un canguro, di un'echidna, di un pollo, di una vipera, di un tritone, di una carpa e di un essere umano.

Non tutti gli animali posseggono l'emoglobina, ma ci sono altre proteine, per esempio istoni, di cui esiste una versione in ogni animale e pianta, e di nuovo molte di queste proteine possono essere cercate in biblioteca. Queste non sono misurazioni vaghe, come la lunghezza delle zampe o la larghezza del cranio, che possono variare con l'età e lo stato di salute dell'esemplare, o addirittura con l'acutezza della vista del misuratore. Sono versioni alternative, espresse con parole precise, della medesima frase in una medesima lingua, le quali possono essere collocate una accanto all'altra e comparate fra loro con la stessa pignoleria e precisione con cui un meticoloso grecista potrebbe collazionare due pergamene di uno stesso Vangelo. Le sequenze di dna sono i vangeli di ogni forma di vita e noi abbiamo imparato a decifrarli.

L'assunto basilare del tassonomista è che organismi strettamente imparentati fra loro posseggono versioni di una particolare frase molecolare più simili di quelle possedute da parenti più lontani. Questo è il cosiddetto «principio di parsimonia». La parsimonia è un altro nome per l'economia. Dato un insieme di animali di cui si conoscono le frasi, per esempio gli otto animali elencati nel paragrafo precedente, il nostro compito è quello di scoprire quale fra tutti i possibili diagrammi ad albero che collegano gli otto animali sia il più parsimonioso. L'albero più parsimonioso è quello che richiede meno assunti, ossia quello che suppone il numero minimo di cambiamenti di parole nell'evoluzione e la quantità minima di convergenza. Siamo autorizzati a supporre la quantità minima di convergenza per ragioni di mera improbabilità. È improbabile, specialmente se gran parte dell'evoluzione molecolare è neutra, che due animali non imparentati fra loro possano presentare esattamente la stessa sequenza, parola per parola, lettera per lettera.

Quando si tenta di considerare tutti gli alberi possibili ci si imbatte in difficoltà di calcolo. Se gli animali da classificare sono solo tre, anche il numero degli alberi possibili è solo tre: A si unisce con B escludendo C; A con C escludendo B; e B con C escludendo A. Si può fare lo stesso calcolo per numeri maggiori di animali da classificare, e il numero degli alberi possibili aumenta rapidamente.

Quando ci sono solo quattro animali da considerare, il numero totale degli alberi possibili è ancora facilmente calcolabile, salendo solo a 15. Non ci vuole il computer per stabilire quale dei 15 sia il più economico. Se però si tratta di considerare 20 animali, il numero degli alberi possibili, secondo il mio calcolo è di 8.200.794.532.637.891.559.375 (vedi figura 9). È stato calcolato che il più veloce fra tutti i computer di oggi richiederebbe 10 miliardi di anni, pressa poco l'età dell'universo, per scoprire l'albero Batterio Celacanto Gatto Tigre Cane Volpe Babbuino Scimmia reso Scimpanzè Uomo Gibbone Lemure Aringa Rombo Lumaca Polpo Calamaro Sequoia Pino Quercia Questo albero genealogico è corretto.

Esistono altri 8.200.794.532.637.891.559.374 modi di classificare questi 20 organismi, e sono tutti sbagliati. genealogico più economico per solo 20 animali. E spesso i tassonomisti vogliono costruire alberi di più di 20 animali.

Benché i tassonomisti molecolari siano stati i primi a capire bene questo punto, questo problema dell'eliminazione dei grandi numeri è stato in realtà in agguato nell'intera tassonomia non molecolare. I tassonomisti non molecolari lo hanno semplicemente eluso facendo stime intuitive. Fra tutti gli alberi genealogici possibili che possono essere trovati, un gran numero possono essere eliminati immediatamente: per esempio tutti quei milioni di alberi genealogici concepibili che collocano gli esseri umani più vicini ai lombrichi che agli scimpanzè.

I tassonomisti non si preoccupano neppure di considerare alberi genealogici così palesemente assurdi, ma puntano invece sul numero relativamente piccolo di alberi che non violano in modo troppo radicale i loro preconcetti. Questo modo di procedere è probabilmente giusto, anche se c'è sempre il pericolo che l'albero veramente più parsimonioso sia uno di quelli che sono stati eliminati senza troppa riflessione. Anche i computer possono essere programmati per prendere scorciatoie e il problema di eliminare i grandi numeri può essere radicalmente semplificato.

L'informazione molecolare è così ricca che noi possiamo affrontare il nostro compito tassonomico separatamente per diverse proteine. Possiamo quindi usare le conclusioni ottenute dallo studio di una molecola per verificare le conclusioni ottenute dallo studio di un'altra. Se temiamo che la storia narrata da una molecola proteica possa essere resa confusa dalla convergenza, possiamo verificarla immediatamente esaminando quella di un'altra molecola proteica. L'evoluzione convergente è in realtà una sorta speciale di coincidenza. Le coincidenze sono caratterizzate dal fatto che, se possono accadere una volta, è molto meno probabile che accadano due volte. È molto, molto meno probabile che accadano tre volte. Considerando un numero sempre maggiore di molecole proteiche separate, possiamo quasi eliminare la coincidenza.

Per esempio, in uno studio compiuto da un gruppo di biologi neozelandesi, undici animali furono classificati non una ma cinque volte indipendentemente, usando cinque diverse molecole proteiche. Gli undici animali erano la pecora, la scimmia reso, il cavallo, il canguro, il ratto, il coniglio, il cane, il maiale, l'uomo, la mucca e lo scimpanzè. L'idea era quella di elaborare un albero dei rapporti fra gli undici animali usando una proteina e poi di vedere se, usando una proteina diversa, si otteneva lo stesso albero di rapporti. Poi di riprovare con una terza, una quarta e una quinta proteina. In teoria, se l'evoluzione non fosse vera, ciascuna delle cinque proteine potrebbe fornire un albero di «rapporti» completamente diverso.

Le cinque sequenze proteiche erano già tutte disponibili in biblioteca per tutt'e undici gli animali prescelti. Per 11 animali ci sono 654.729.075 possibili alberi di rapporti da considerare, e si dovevano usare i metodi consueti per abbreviare i procedimenti. Per ciascuna delle cinque molecole proteiche il computer stampò l'albero di rapporti più parsimonioso. In questo modo si ottennero cinque migliori stime indipendenti circa il vero albero di rapporti fra questi undici animali. Il risultato più chiaro in cui si potesse sperare era che tutt'e cinque gli alberi stimati risultassero identici. La probabilità di ottenere questo risultato per puro caso è di fatto piccolissima: il numero corrispondente ha 31 zeri dopo la virgola. Non dovremmo sorprenderci se dovesse capitarci di trovare un accordo meno perfetto di questo: ci si può infatti attendere una certa quantità di evoluzione convergente e di coincidenza. Dovremmo invece preoccuparci se fra i vari alberi non ci fosse una misura di accordo consistente. In effetti i cinque alberi risultarono essere non del tutto identici ma comunque molto simili. Tutt'e cinque le molecole concordano nel collocare l'uomo, lo

scimpanzè e la scimmia reso in posizioni vicine fra loro, ma c'è qualche disaccordo su quale, fra gli altri animali, sia il più vicino a questo gruppo: l'emoglobina B dice il cane; il fibrinopeptide B dice il ratto; il •fibrinopeptide A dice un gruppetto formato da ratto e coniglio; e l'emoglobina A dice un gruppetto formato dal ratto, dal coniglio e dal cane.

Abbiamo un progenitore comune ben definito col cane, e un altro progenitore comune ben definito col ratto. Questi due progenitori sono realmente esistiti in un particolare momento nella storia. Uno di essi dev'essere più recente dell'altro, cosicché o l'emoglobina B o il fibrinopeptide B devono essere in errore nella stima dei rapporti filogenetici. Come ho detto, non abbiamo ragione di preoccuparci di discrepanze minori come questa, giacché è lecito attendersi una certa quantità di convergenza e di coincidenza. Se siamo veramente imparentati in modo più stretto col cane, ciò significa che fra l'uomo e il ratto c'è stata una convergenza rispetto al nostro fibrinopeptide B. Se invece siamo veramente imparentati in modo più stretto col ratto, ciò significa che fra l'uomo e il cane c'è stata una convergenza rispetto alla nostra emoglobina B. Possiamo farci un'idea di quale di queste due possibilità sia la più probabile considerando anche altre molecole. Io non posso però dilungarmi oltre su questo argomento, avendo ormai stabilito il punto che mi stava a cuore.

Ho avuto già occasione di dire che la tassonomia fu uno dei campi della biologia in cui infuriarono le più astiose controversie. Stephen J. Gould lo ha ben caratterizzato con l'espressione «nomi e malanimo». I tassonomisti manifestano una dedizione appassionata alle loro scuole di pensiero, un calore che potremmo attenderci nelle scienze politiche o in economia, ma ben di rado nella scienza accademica. È chiaro che i membri di una particolare scuola di tassonomia vedono se stessi come un gruppo di confratelli fatti segno a persecuzioni, come i primi cristiani. Io me ne resi conto per la prima volta quando un tassonomista mio conoscente mi comunicò, pallido per lo sbigottimento, la «notizia» per lui sconvolgente che il Tal dei Tali (il nome non ha importanza) era «passato dalla parte dei cladisti».

La seguente breve esposizione delle scuole di pensiero tassonomiche irriterà probabilmente alcuni membri di queste scuole, ma non più di quanto essi non si infurino già abitualmente fra loro, cosicché non rischio di provocare alcun danno indebito. In funzione della loro filosofia fondamentale, i tassonomisti si suddividono in due campi principali. Da un lato ci sono coloro che non fanno mistero del fatto che il loro obiettivo è quello di scoprire rapporti filogenetici reali. Per loro (e per me) un buon albero tassonomico è un albero genealogico di rapporti filogenetici. Nel lavoro di classificazione si usano tutti i metodi disponibili per fare le migliori congetture possibili sul grado del rapporto di parentela tra i vari animali. È difficile trovare un nome appropriato per questi tassonomisti poiché quello che sarebbe il loro nome più ovvio, «tassonomisti evoluzionistici», è stato usurpato da una particolare sottoscuola. Essi vengono chiamati talvolta «fileticisti». Io ho scritto questo capitolo, finora, da un punto di vista fileticistico.

Ci sono però molti tassonomisti che procedono in un modo diverso, e per motivi del tutto ragionevoli. Pur essendo probabilmente d'accordo sulla tesi che il fine ultimo della tassonomia sia quello di fare scoperte sui rapporti filogenetici, essi insistono nel mantenere la pratica della tassonomia separata dalla teoria - presumibilmente dalla teoria evoluzionistica - su ciò che ha condotto al modello di somiglianze. Questi tassonomisti studiano i modelli di somiglianze di per sé. Essi non intendono formulare giudizi anticipati sul problema se un modello di somiglianze sia causato o no dalla storia evolutiva e se la stretta somiglianza sia dovuta o no a uno stretto rapporto di parentela.

Essi preferiscono costruire la loro tassonomia fondandosi sulla sola base del modello di somiglianze.

Un vantaggio di questo procedimento è che, se si hanno dei dubbi sulla verità dell'evoluzione, si possono usare i complessi di somiglianze per verificarla. Se l'evoluzione è vera, le somiglianze fra animali seguiranno certi modelli prevedibili, in particolare quello dell'annidamento gerarchico. Se l'evoluzione è falsa, solo il cielo sa quale modello dovremmo attenderci, ma certo non c'è alcuna ragione ovvia per attenderci un modello gerarchico annidato. Se, nel compiere il proprio lavoro tassonomico, si suppone la verità dell'evoluzione - sostiene questa scuola -, non si possono poi usare i risultati del proprio lavoro di tassonomia per sostenere la verità dell'evoluzione: l'argomentazione

sarebbe infatti circolare. Questo tipo di ragionamento avrebbe validità solo se si mettesse seriamente in dubbio la verità dell'evoluzione. Ancora una volta, è difficile trovare un nome adatto per questa seconda scuola di pensiero fra i tassonomisti. Io li chiamerò i «misuratori di pure somiglianze».

I fileticisti, ossia i tassonomisti che si propongono apertamente di scoprire rapporti evolutivi, si suddividono ulteriormente in due scuole di pensiero. Queste sono i cladisti, che seguono i principi esposti nel famoso libro di Willi Hennig *Phylogenetic Systematics*; e i tassonomisti evoluzionistici «tradizionali». I cladisti sono ossessionati dalle ramificazioni. Per loro l'obiettivo della tassonomia è quello di scoprire l'ordine in cui le linee genealogiche si sono separate nel tempo dell'evoluzione. Essi non si preoccupano di quanto, o di quanto poco, quelle linee siano mutate dopo la separazione. I tassonomisti evoluzionistici «tradizionali» (la parola non va intesa in senso peggiorativo) differiscono dai cladisti principalmente per il fatto di non considerare il processo dell'evoluzione solo quale si esprime nel processo di ramificazione. Essi tengono conto anche della quantità totale di mutamento che ha luogo nel corso dell'evoluzione, non solo della ramificazione.

I cladisti pensano sin dal principio del loro lavoro nei termini di alberi che si ramificano. Essi cominciano, idealmente, scrivendo tutti gli alberi genealogici possibili per gli animali di cui si occupano (solo biforcazioni perché ci sono limiti alla pazienza di chiunque!). Come abbiamo visto parlando della tassonomia molecolare, quando si tenta di classificare grandi quantità di animali questo compito diventa estremamente difficile, poiché il numero di alberi possibili diventa astronomicamente grande. Come abbiamo visto, però, ci sono per fortuna scorciatoie e approssimazioni utili, le quali permettono di affrontare in pratica questo tipo di tassonomia. Se, per fare un esempio, cercassimo di classificare solo tre animali - il calamaro, l'aringa e l'uomo -, gli unici alberi possibili (con ramificazioni in due sole direzioni) sono i seguenti:

1. Calamaro e aringa sono vicini fra loro, mentre l'uomo rappresenta il «gruppo estraneo».
2. Uomo e aringa sono vicini fra loro, mentre il calamaro rappresenta il gruppo estraneo.
3. Calamaro e uomo sono vicini fra loro, mentre l'aringa rappresenta il gruppo estraneo.

I cladisti esaminerebbero uno dopo l'altro ciascuno di questi tre alberi possibili e sceglierebbero quello migliore. Come si può riconoscere l'albero migliore? Fondamentalmente è l'albero che unisce gli animali che hanno in comune il maggior numero di caratteri. Noi etichettiamo come «gruppo estraneo» l'animale che ha il numero minimo di caratteri in comune con gli altri due. Dei tre alberi genealogici presentati qui sopra sarebbe preferibile il secondo, poiché uomo e aringa hanno in comune molti più caratteri di quanti non ne abbiano il calamaro e l'aringa o il calamaro e l'uomo. Il calamaro è il gruppo estraneo perché non ha molti caratteri in comune né con l'uomo né con l'aringa.

In realtà non si tratta solo di limitarsi a contare i caratteri in comune, poiché alcuni tipi di caratteri vengono deliberatamente ignorati. I cladisti attribuiscono una speciale importanza ai caratteri che si sono evoluti più recentemente. I caratteri antichi che tutti i mammiferi hanno ereditato dal primo mammifero, per esempio, sono inutili per eseguire classificazioni all'interno della classe dei mammiferi. I metodi usati dai cladisti per stabilire quali caratteri siano antichi sono interessanti, ma esorbitano dall'argomento di questo libro. La cosa principale da ricordare a questo punto è che, almeno in linea di principio, il cladista pensa a tutti i possibili alberi biforcantisi che potrebbero unire l'insieme di animali di cui sta occupandosi, e cerca di scegliere l'albero giusto. E il vero cladista non fa mistero del fatto che egli pensa agli alberi che si biforcano o ai «cladogrammi» come ad alberi genealogici, alberi che indicano il grado di parentela fra i vari organismi.

L'interesse ossessivo per le sole ramificazioni, se spinto all'estremo, potrebbe condurre a strani risultati. È teoricamente possibile che una specie sia identica in ogni particolare a parenti lontani, essendo invece enormemente diversa da parenti più prossimi.

Supponiamo, per esempio, che due specie di pesci molto simili, che possiamo chiamare Giacobbe ed Esaù, siano vissute 300 milioni di anni fa. Entrambe queste specie fondarono gerarchie di discendenti, le quali si sono conservate fino a oggi. I discendenti di Esaù ristagnarono. Essi continuarono a vivere negli abissi marini senza evolversi. Il risultato è che un discendente moderno di Esaù è essenzialmente identico a Esaù, e perciò è anche molto simile a Giacobbe. I discendenti di

Giacobbe si svilupparono e proliferarono, dando infine origine ai moderni mammiferi. Ma anche una linea di discendenti di Giacobbe ristagnò negli abissi marini, lasciando anch'essa discendenti moderni. Questi discendenti moderni sono pesci così simili ai discendenti moderni di Esaù che è molto difficile distinguerli.

Ora, come classificheremo questi animali? Il tassonomista evoluzionista tradizionale riconoscerebbe la grande somiglianza esistente fra i discendenti primitivi di Giacobbe e di Esaù che vivono negli abissi marini e li classificherebbe insieme. Il cladista rigoroso non potrebbe farlo. I discendenti di Giacobbe che vivono negli abissi, pur essendo similissimi ai discendenti di Esaù che vivono nello stesso ambiente, sono purtuttavia imparentati più strettamente con i mammiferi. Il loro progenitore comune con i mammiferi visse in epoca più recente, anche se solo di poco, rispetto al loro progenitore comune con i discendenti di Esaù. Essi dovrebbero perciò essere classificati assieme ai mammiferi. Questo fatto può sembrare strano, ma io personalmente lo vedo di buon occhio. Esso è quanto meno estremamente logico e chiaro. Ci sono in effetti dei pregi tanto nel cladismo quanto nella tassonomia evoluzionistica tradizionale, e io non mi darei molto pensiero di come i vari autori classificano gli animali purché mi dicano chiaramente a quali principi si ispirano.

Volgendomi ora all'altra scuola di pensiero principale, quella dei misuratori di pure somiglianze, anch'essi possono essere suddivisi in due sottoscuole. Entrambe le sottoscuole concordano nel bandire l'evoluzione dai loro pensieri quotidiani mentre compiono il loro lavoro di classificazione. Sono però in disaccordo su come procedere in tale lavoro. Una sottoscuola di questi tassonomisti viene talvolta designata col nome di «feneticisti» e a volte con quello di «tassonomisti numerici». Io li chiamerò «misuratori delle distanze medie». L'altra scuola di misuratori della somiglianza ha scelto di chiamarsi col nome di «cladisti trasformati»: nome assai poco felice, poiché questi tassonomisti non sono affatto cladisti! Quando Julian Huxley inventò il termine «clado», lo definì, in modo chiaro ed esente da ogni ambiguità, in termini di ramificazione filogenetica e di discendenza evolutiva. Un clado è l'insieme di tutti gli organismi discesi da un particolare progenitore. Poiché i «cladisti trasformati» si propongono soprattutto di evitare ogni nozione di evoluzione e di discendenza, non potrebbero ragionevolmente chiamarsi cladisti. Alla base di quest'uso linguistico c'è una ragione storica; essi cominciarono come puri cladisti e conservarono alcuni metodi dei cladisti, pur abbandonandone la filosofia fondamentale e la principale giustificazione. Suppongo perciò di non avere altra scelta e di doverli chiamare cladisti trasformati, anche se lo faccio con riluttanza.

I misuratori delle distanze medie non solo si rifiutano di usare nella loro tassonomia l'evoluzione (anche se sono tutti evoluzionisti), ma si ostinano anche a non voler supporre neppure che il modello di somiglianza sarà necessariamente una semplice gerarchia formata da biforcazioni. Essi si sforzano di usare metodi che consentono di scoprire un modello gerarchico se c'è realmente, ma non se non c'è. Il loro intento è quello di chiedere alla Natura di dire loro se è davvero organizzata gerarchicamente.

Questo non è un compito facile, ed è probabilmente giusto dire che non sono realmente disponibili metodi per conseguire questo obiettivo. Quest'obiettivo mi sembra nondimeno tutt'uno col lodevole desiderio di evitare preconcetti. I loro metodi sono spesso piuttosto complessi e matematici, e sono altrettanto adatti per classificare non solo organismi viventi ma anche cose non viventi, per esempio rocce e vestigia archeologiche.

I misuratori delle distanze medie cominciano di solito col misurare nei loro animali tutto ciò che possono. Un po' più di abilità si richiede per interpretare queste misurazioni, ma io non mi addentrerò in questo problema. Infine le misurazioni vengono combinate tutte assieme per produrre un indice di somiglianza (o il suo opposto, un indice di differenza) fra ciascun animale e ciascun altro animale. Volendo, si possono visualizzare gli animali come nubi di punti nello spazio. Ratti, topi, criceti ecc. si troverebbero tutti in una parte dello spazio. Molto lontano, in un'altra parte dello spazio si troverebbe un'altra piccola nube, formata da leoni, tigri, leopardi, ghepardi ecc. La distanza fra due punti quali si vogliano nello spazio è una misura del grado di somiglianza fra due animali, determinato combinando assieme un gran numero di loro attributi. La distanza fra leone e tigre è piccola. Lo stesso si può dire per la distanza fra ratto e topo. È invece grande la distanza fra

ratto e tigre, o fra topo e leone. La combinazione degli attributi si fa di solito con l'aiuto di un computer. Lo spazio in cui questi animali si trovano è superficialmente simile al Paese dei Biomorfi, ma le «distanze» riflettono somiglianze corporee piuttosto che somiglianze genetiche. Una volta eseguito il calcolo di un indice di somiglianza (o di distanza) media fra ciascun animale e ciascun altro animale, si programma il computer per analizzare la serie di distanze/somiglianze e per cercare di inserirle in un modello di distribuzione gerarchica. Purtroppo ci sono molte controversie su quale sia il metodo di calcolo migliore per definire il grado di affinità fra animali diversi. Non esiste alcun metodo chiaramente corretto, e i metodi non danno tutti la stessa soluzione. Peggio ancora, può darsi che qualcuno di questi metodi per computer sia eccessivamente «ansioso» di «vedere» un ordinamento gerarchico di gruppi all'interno di gruppi, anche quando in realtà un tale ordinamento non esiste. La scuola dei misuratori di distanze, o «tassonomisti numerici», è negli ultimi tempi un po' passata di moda. A mio parere questo declino dovrebbe essere una fase temporanea, come accade spesso alle mode, e credo che questa sorta di «tassonomia numerica» non debba essere depennata troppo facilmente. Io mi attendo un suo ritorno. L'altra scuola di misuratori di modelli puri è quella dei cosiddetti cladisti trasformati, i quali, come abbiamo visto, hanno scelto di chiamarsi così per ragioni storiche. È da questo gruppo che deriva principalmente il «malanimo». Io non seguirò l'uso solito di ricostruire le loro origini storiche dai ranghi dei veri cladisti. Nella filosofia che li ispira, i cosiddetti cladisti trasformati hanno in comune molto di più con l'altra scuola dei misuratori di modelli puri, quelli chiamati spesso «feneticisti» o «tassonomisti numerici», di cui mi sono appena occupato sotto il nome di misuratori di distanze medie. Ciò che questi hanno in comune fra loro è un'avversione a trascinare l'evoluzione nella pratica della tassonomia, anche se ciò non indica necessariamente un'ostilità all'idea dell'evoluzione stessa.

Quel che i cladisti trasformati condividono con i veri cladisti sono molti metodi di lavoro pratico. Tanto gli uni quanto gli altri pensano, fin dal principio, in termini di alberi che si biforcano. E sia gli uni sia gli altri scelgono certi tipi di caratteristiche come tassonomicamente importanti, mentre considerano certi altri tipi tassonomicamente irrilevanti. Le due scuole si differenziano fra loro nel modo in cui giustificano tale discriminazione. Come i misuratori di distanze medie, i cladisti trasformati non si propongono di scoprire alberi genealogici, bensì ricercano solo alberi di somiglianze pure. Essi concordano con i misuratori di distanze medie sull'opportunità di lasciare aperto il problema se il modello di somiglianza rifletta o no la storia evolutiva. A differenza dei misuratori di distanze, i quali, almeno in teoria, sono pronti a lasciar dire alla natura se essa sia o no gerarchicamente organizzata, i cladisti trasformati suppongono che essa lo sia. È per loro un assioma, un articolo di fede, che le cose debbano essere classificate in gerarchie ramificate (o, cosa equivalente, in nidi annidati). Poiché il loro albero ramificato non ha nulla a che fare con l'evoluzione, non occorre applicarlo necessariamente a organismi viventi. I metodi della cladistica trasformata possono essere usati, secondo i loro fautori, per classificare non solo animali e piante ma anche rocce, pianeti, i libri di una biblioteca e le ceramiche dell'Età del Bronzo. In altri termini, i cladisti trasformati non accetterebbero l'osservazione che ho fatto nel mio paragone con i libri di una biblioteca ossia che l'evoluzione sia l'unica base sana per una classificazione gerarchica unica. I misuratori di distanze medie, come abbiamo visto, misurano quanto ogni animale sia lontano da ciascun altro animale, dove «lontano» significa «non assomiglia» e «vicino» significa «assomiglia». Solo allora, dopo avere calcolato una sorta di indice medio cumulativo della somiglianza, cominciano a tentare di interpretare i loro risultati nei termini di una gerarchia ramificata, formata da gruppi all'interno di un gruppo, o di un diagramma «ad albero». I cladisti trasformati, invece, come i veri cladisti a cui un tempo appartenevano, introducono fin dall'inizio un pensiero ramificato. Come i veri cladisti, essi comincerebbero, almeno in linea di principio, con lo scrivere tutti i possibili alberi biforcantisi, e poi sceglierebbero il migliore.

Ma di che cosa stanno parlando realmente i cladisti trasformati quando considerano possibile ciascun «albero» e che cosa intendono per «il migliore»? A quale ipotetico stato del mondo corrisponde ciascun albero? Per un vero cladista, un seguace di W. Hennig, la risposta è molto chiara. Ognuno dei 15 alberi possibili che uniscono quattro animali rappresenta un possibile albero

genealogico. Di tutti i 15 alberi genealogici concepibili che uniscono quattro animali, uno e uno solo dev'essere quello giusto. La discendenza di specie animali da specie anteriori si verificò realmente nel mondo. Se supponiamo che tutte le ramificazioni siano biforcazioni, ci sono 15 storie possibili. Quattordici di quelle storie possibili devono essere sbagliate. Solo una può essere giusta, può corrispondere al modo in cui la storia si verificò realmente. Fra tutti i possibili 135.135 alberi genealogici culminanti in otto animali, 135.134 devono essere sbagliati. Soltanto uno rappresenta la verità storica. Potrebbe non essere facile sapere con sicurezza quale sia quello giusto, ma il vero cladista può almeno essere sicuro che non più di uno è quello giusto.

Ma a che cosa corrispondono i 15 (o i 135.135, o qualunque sia il loro numero) alberi possibili, e l'unico albero giusto, nel mondo non evoluzionistico del cladista trasformato? La risposta, come ha sottolineato il mio collega ed ex allievo Mark Ridley in *Evolution and Classification*, è: non a moltissimo. Il cladista trasformato si rifiuta di prendere in considerazione il concetto di «discendenza». «Progenitore», per lui, è una parola sporca.

Egli insiste, d'altra parte, sulla tesi che la classificazione dev'essere una gerarchia di ramificazione. Così, se i 15 (o 135.135) possibili alberi gerarchici non sono alberi di storia ancestrale, che cosa sono mai? Non si può fare altro in proposito che appellarsi alla filosofia antica per qualche vaga nozione idealistica di un'organizzazione gerarchica del mondo; per qualche nozione che tutto nel mondo ha il suo «opposto», il suo yin o yang mistico. Non si perviene mai a un livello molto più concreto di questo. Certamente non è possibile, nel mondo non evoluzionistico del cladista trasformato, fare affermazioni forti e chiare come quella che «solo uno dei 945 alberi possibili che uniscono 6 animali può essere giusto; tutti gli altri devono essere sbagliati».

Perché «progenitore» è una parola sporca per i cladisti? Non che essi pensino (lo spero) che non ci furono mai progenitori. Il fatto è, piuttosto, che essi hanno deciso che i progenitori non devono avere alcun posto nella tassonomia. Questa è una posizione difendibile per quanto concerne la pratica quotidiana della tassonomia. Nessun cladista disegna in realtà progenitori in carne e ossa su alberi genealogici, mentre i tassonomisti evoluzionisti tradizionali a volte lo fanno. I cladisti, di ogni sorta, considerano tutti i rapporti fra animali reali, osservati, come rapporti di parentela, una questione di forma. Questa posizione è perfettamente ragionevole. Quel che non è ragionevole è la trasformazione di questo atteggiamento in un tabù contro il concetto stesso di discendenza, contro l'uso del linguaggio della discendenza per giustificare l'adozione dell'albero gerarchicamente ramificato come base per la propria tassonomia.

Ho lasciato per ultimo l'aspetto più strano della scuola tassonomica del cladismo trasformato. Non contenti di una convinzione perfettamente ragionevole che possa esserci qualche giustificazione per lasciar fuori assunti evolutivi e ancestrali dalla pratica della tassonomia, convinzione che essi condividono con i «misuratori di distanze» feneticisti, alcuni cladisti trasformati sono andati oltre e hanno concluso che dev'esserci qualcosa di sbagliato nell'evoluzione stessa! Il fatto è così strano che si stenta a crederlo, ma alcuni fra i più autorevoli «cladisti trasformati» professano una vera ostilità verso l'idea di evoluzione stessa, e specialmente verso la teoria darwiniana dell'evoluzione. Due di loro, G. Nelson e N. Platnick dell'American Museum of Natural History di New York, sono arrivati addirittura al punto di scrivere che «il darwinismo [...] è, in breve, una teoria che è stata messa alla prova e trovata falsa».

Mi piacerebbe sapere in che cosa consista questa «prova» e, ancor più, vorrei sapere per mezzo di quale teoria alternativa Nelson e Platnick vorrebbero spiegare i fenomeni spiegati dal darwinismo, e specialmente la complessità adattiva.

Non che tutti i cladisti trasformati siano creazionisti fondamentalisti. La mia interpretazione è che essi si compiacciano di un'idea esagerata dell'importanza della tassonomia in biologia.

Essi hanno deciso, forse a ragione, di poter meglio praticare la tassonomia dimenticandosi dell'evoluzione, e specialmente; non usando mai il concetto di progenitore nel riflettere sulla tassonomia. Nello stesso modo uno studioso, per esempio, delle cellule nervose, potrebbe decidere che il riflettere sull'evoluzione non gli sia di alcun aiuto. Lo specialista dei neuroni ammette che le cellule nervose siano il prodotto dell'evoluzione ma ritiene di non aver bisogno di questo fatto per le sue ricerche. Egli ha bisogno di sapere molto sulla fisica e sulla chimica, ma ritiene che il

darwinismo non abbia alcuna pertinenza con le sue ricerche quotidiane sugli impulsi nervosi. Questa è una posizione difendibile. Non si può invece ragionevolmente dire che, se non si ha alcun bisogno di usare una particolare teoria nella pratica quotidiana della propria branca scientifica particolare, tale teoria debba essere falsa. Si potrà fare un'affermazione del genere solo qualora si abbia una considerazione grandiosa dell'importanza della propria branca scientifica.

Ma neppure in questo caso si può dire che si tratti di un atteggiamento logico. Un fisico non ha certamente bisogno del darwinismo per coltivare la fisica. Egli può pensare che la biologia sia una disciplina banale rispetto alla fisica. Da un tale atteggiamento può seguire che, per lui, il darwinismo abbia scarsa importanza per la scienza in generale. Egli non potrebbe però concludere ragionevolmente da questo fatto che esso è perciò falso! Eppure questo è essenzialmente ciò che sembrano aver fatto alcuni fra i capiscuola della cladistica trasformata.

«Falso», si noti bene, è precisamente il vocabolo usato da Nelson e Platnick. Non occorre dire che le loro parole sono state raccolte dai sensibili microfoni da me menzionati nel capitolo precedente, e ne è risultata una pubblicità considerevole. Essi si sono procurati un posto d'onore nella letteratura fondamentalistica, creazionistica. Quando, poco tempo fa, uno fra i principali cladisti trasformati venne a tenere una conferenza nella mia università, richiamò una folla più numerosa di quella attratta da ogni altro conferenziere di quell'anno. Non è difficile rendersi conto del perché.

Non c'è dubbio che osservazioni come «il darwinismo [...] è [...] una teoria che è stata messa alla prova e trovata falsa», pronunciate da biologi di una certa fama e appartenenti al personale di un museo nazionale rispettato, saranno tanta manna per i creazionisti e per quanti altri abbiano un attivo interesse a divulgare delle falsità. Questa è l'unica ragione per cui ho infastidito i miei lettori con l'argomento del cladismo trasformato. Come ha scritto con maggior moderazione Mark Ridley, in una recensione del libro in cui Nelson e Platnick sostenevano che il darwinismo è falso, chi avrebbe potuto immaginare che tutto ciò che essi intendevano realmente dire era che le specie ancestrali sono difficili da rappresentare in una classificazione cladista? Ovviamente non è facile definire la precisa identità dei progenitori, e ci sono ragioni abbastanza buone per non tentarlo neppure. Ma fare affermazioni che incoraggino altri a concludere che non ci furono mai progenitori significa corrompere il linguaggio e tradire la verità.

Ora farei meglio a uscire e andare a zappare il giardino, o a fare qualche altra cosa.

XI

Rivali condannate

Nessun biologo serio dubita del fatto che l'evoluzione sia accaduta, né del fatto che tutti gli organismi viventi siano imparentati fra loro. Qualche biologo ha però sollevato dei dubbi sulla particolare teoria di Darwin circa il modo in cui l'evoluzione ebbe luogo. A volte questa risulta essere solo una discussione su parole. La teoria degli equilibri punteggiati, per esempio, può essere presentata come antidarwiniana. Come però ho sostenuto nel capitolo IX, essa è in realtà una variante minore del darwinismo, e non appartiene ad alcun capitolo su teorie rivali.

Ci sono però altre teorie che non sono, nel modo più preciso, versioni del darwinismo, teorie che sono contrarie allo spirito stesso del darwinismo. Queste teorie rivali formano l'argomento di questo capitolo. Esse comprendono diverse versioni del cosiddetto lamarckismo; e inoltre altri punti di vista, come il «neutralismo», il «mutazionismo» e il creazionismo, che di tanto in tanto sono stati avanzati come alternative alla selezione darwiniana.

Il modo ovvio per scegliere fra teorie rivali è quello di esaminare le prove. I tipi di teoria lamarckiani, per esempio, vengono tradizionalmente rifiutati - e a ragione - perché non è mai stata trovata alcuna buona prova a loro sostegno (non per mancanza di impegno; in alcuni casi, anzi, lamarckiani troppo zelanti si sono costruite le prove che non riuscivano a trovare). In questo capitolo prenderò una strada diversa, anche perché numerosi altri libri hanno già esaminato le prove e concluso a favore del darwinismo. Anziché esaminare le prove pro e contro le teorie rivali, adotterò un'impostazione più teorica. Sosterrò che il darwinismo è l'unica teoria nota che è in grado

in linea di principio di spiegare certi aspetti della vita. Se ho ragione io ciò significa che, quand'anche non ci fosse alcuna prova reale a favore della teoria darwiniana (ma ovviamente ce ne sono), avremmo ancora delle buone ragioni per preferirla a tutte le teorie rivali.

Un modo per dare una certa teatralità alla presentazione di questo punto consiste nel fare una predizione. Io predico che, se mai verrà scoperta una forma di vita in un'altra parte dell'universo, per quanto essa possa essere esotica e bizzarramente aliena, risulterà simile alla vita sulla Terra sotto un aspetto chiave: si sarà evoluta in virtù di una qualche sorta di selezione darwiniana. Questa è, purtroppo, una predizione che non potremo, con ogni probabilità, verificare nel corso della nostra vita; essa rimane però un modo efficace per sottolineare una verità importante sulla vita sul nostro pianeta. La teoria darwiniana è in grado, in linea di principio, di spiegare la vita. Nessun'altra teoria che sia mai stata suggerita finora è all'altezza di questo compito. Io darò una dimostrazione di questo fatto discutendo tutte le teorie rivali note, non le prove a favore o contro bensì la loro adeguatezza, in linea di principio, come spiegazioni della vita.

Innanzitutto devo specificare che cosa si intenda per «spiegare» la vita. Ci sono, ovviamente, molte proprietà di cose viventi che potremmo elencare, e alcune di esse potrebbero essere spiegate anche da teorie rivali. Molti fatti sulla distribuzione di molecole proteiche, come abbiamo visto, possono essere dovuti a mutazioni genetiche neutre piuttosto che alla selezione darwiniana. C'è però una particolare proprietà degli organismi viventi che è spiegabile, secondo me, solo dalla selezione darwiniana.

Questa proprietà è quella che è stata l'argomento ricorrente di questo libro: la complessità adattiva. Gli organismi viventi sono ben adattati a sopravvivere e a riprodursi nei loro ambienti, in modi troppo numerosi e statisticamente improbabili perché possano essersi determinati in conseguenza di un singolo colpo di fortuna. Seguendo Paley, ho usato l'esempio dell'occhio. Due o tre dei caratteri «ben progettati» di un occhio potrebbero avere avuto origine concepibilmente per un caso fortunato. Ma già il semplice numero delle parti coordinate fra loro, tutte ben adattate alla visione e ben adattate l'una all'altra, richiede un tipo speciale di spiegazione che vada oltre il mero caso. La spiegazione darwiniana, ovviamente, implica anche il caso, nella forma di mutazioni. Ma il caso viene filtrato cumulativamente dalla selezione, passo dopo passo, per molte generazioni. In altri capitoli abbiamo visto che questa teoria è capace di fornire una spiegazione soddisfacente della complessità adattiva. In questo capitolo dimostrerò che nessun'altra teoria nota ne è capace. Consideriamo, innanzitutto, la rivale storica di maggior rilievo del darwinismo, la teoria lamarckiana. Quando questa teoria fu proposta per la prima volta, all'inizio dell'Ottocento, non era una rivale del darwinismo, che non esisteva ancora. Il cavaliere de Lamarck era in anticipo sul proprio tempo. Egli fu uno degli intellettuali del Settecento che addussero argomenti a sostegno dell'evoluzione. In questo aveva ragione, e meriterebbe di essere onorato già per questo solo motivo, assieme al nonno di Darwin, Erasmus, e ad altri. Lamarck offrì inoltre la migliore teoria del meccanismo dell'evoluzione che qualcuno fosse in grado di proporre a quel tempo, ma non c'è alcuna ragione per supporre che, se la teoria darwiniana del meccanismo dell'evoluzione fosse stata disponibile al suo tempo, egli l'avrebbe rifiutata. Essa però non esisteva ancora, ed è un vero peccato che, almeno nel mondo di lingua inglese, il nome di Lamarck sia ricordato come un'etichetta per designare un errore - la sua teoria del meccanismo dell'evoluzione - piuttosto che per la sua giusta fede nel fatto dell'evoluzione. Questo non è uno studio storico e io non affronterò quindi una dotta discussione di che cosa abbia scritto esattamente lo stesso Lamarck. Possiamo dire però che nelle sue parole c'era una certa dose di misticismo: egli aveva, per esempio, una forte fede nel progresso lungo quella che molte persone concepiscono ancor oggi come una scala della vita; e parlava di animali che si sforzavano, come se, in un certo senso, volessero evolversi coscientemente. Prescindendo da questi aspetti mistici, esaminerò quegli elementi del lamarckismo che, almeno a tutta prima, sembrerebbero avere una discreta possibilità di offrire una vera alternativa al darwinismo.

Questi elementi, gli unici adottati da «neolamarckiani» moderni, sono fondamentalmente due: l'ereditarietà dei caratteri acquisiti e il principio dell'uso e disuso.

Il principio dell'uso e disuso afferma che le parti di un organismo che vengono usate spesso

acquistano maggiori dimensioni. Le parti che non vengono usate tendono ad atrofizzarsi e a sparire. È un fatto osservato che, quando si esercitano particolari muscoli, essi si sviluppano, mentre i muscoli che non vengono mai usati si rimpiccioliscono. Esaminando il corpo di un uomo, possiamo dire quali muscoli usi e quali non usi. Possiamo essere in grado di congetturare la sua professione, o le attività ricreative che pratica. Gli entusiasti del culturismo si servono del principio dell'uso e disuso per «costruire» il loro corpo (di qui il nome inglese di body-building), come se si trattasse di una scultura, dandogli qualsiasi forma innaturale venga richiesta dalla moda in questa peculiare subcultura. I muscoli non sono le uniche parti del corpo a rispondere all'uso in questo modo. Se si cammina a piedi scalzi, la pelle della pianta del piede si indurisce. È facile distinguere un contadino da un impiegato di banca guardando solo le loro mani. Le mani del contadino sono callose, indurite dalla lunga esposizione a un lavoro faticoso. Se le mani dell'impiegato hanno qualche callo, questo si riduce a una piccola callosità sul dito medio prodotta dall'uso continuo di una penna.

Il principio dell'uso e disuso consente agli animali di migliorare progressivamente, nel corso della loro vita, nel compito di sopravvivere nel loro mondo, in conseguenza del fatto stesso di vivere in tale mondo. Gli esseri umani, in conseguenza dell'esposizione diretta alla luce del sole - o della mancanza di una tale esposizione - sviluppano un colore della pelle che li mette in grado di sopravvivere meglio nelle particolari condizioni locali. Un'esposizione eccessiva alla luce del sole è pericolosa. Gli entusiasti dei bagni di sole con una pelle molto chiara sono soggetti al cancro della pelle. Un'esposizione insufficiente alla luce del sole, d'altra parte, conduce a carenza di vitamina D e a rachitismo, come si osserva talvolta in bambini di pelle scura per un fatto di eredità che vivono in Scandinavia. Il pigmento scuro melanina, che viene sintetizzato sotto l'influenza della luce del sole, produce un filtro che protegge i tessuti sottostanti dagli effetti dannosi della radiazione solare. Se una persona abbronzata dal sole si trasferisce in un clima in cui la radiazione solare è meno intensa, la melanina scompare, e il corpo acquista la capacità di trarre beneficio dal poco sole che c'è.

Questo può essere presentato come un esempio del principio dell'uso e disuso: la pelle si abbronzava quando viene «usata», e si stinge fino al bianco quando non viene «usata». Alcune razze tropicali, ovviamente, ereditano uno spesso strato di melanina indipendentemente dal fatto che i singoli individui siano o no esposti alla radiazione solare.

Passiamo ora a considerare l'altro principio lamarckiano, l'idea che tali caratteri acquisiti vengano ereditati dalle generazioni successive. Tutte le prove disponibili suggeriscono che quest'idea è semplicemente falsa, ma per la maggior parte della storia si è creduto che fosse vera. Questa idea non fu certo inventata da Lamarck, il quale si limitò a incorporare nella sua teoria il sapere popolare del suo tempo. In alcuni ambienti la gente crede ancora in questa idea. Mia madre aveva un cane che di tanto in tanto zoppicava, tirando su una zampa e camminando sulle altre tre. Una sua vicina aveva un cane più vecchio che aveva perduto una zampa posteriore dopo essere stato investito da un'automobile. Mia madre era convinta che il cane della sua vicina doveva essere il padre del proprio cane, e la prova consisteva appunto nel fatto che questo ne aveva evidentemente ereditato la zoppia. La sapienza popolare e le favole sono ricche di leggende simili. Molte persone credono, o vorrebbero credere, nell'eredità dei caratteri acquisiti. Fino al nostro secolo questa fu la teoria dell'ereditarietà dominante anche fra biologi seri. Lo stesso Darwin credette in essa, senza però includerla nella sua teoria dell'evoluzione, cosicché il suo nome non è legato a essa nella nostra mente.

Se si accoppia l'ereditarietà dei caratteri acquisiti al principio dell'uso e disuso si ottiene quella che sembrerebbe a tutta prima una buona ricetta per il miglioramento evolutivo. È questa ricetta a venire comunemente etichettata come teoria lamarckiana dell'evoluzione. Se varie generazioni successive hanno la pelle della pianta dei piedi più dura in conseguenza del fatto di camminare a piedi scalzi su terreno accidentato, ogni generazione - così dice la teoria - avrà la pelle leggermente più dura rispetto alla generazione anteriore. Ogni generazione consegue un vantaggio sulla generazione precedente. Alla fine nasceranno bambini con la pelle dei piedi già indurita (e così è realmente, anche se, come vedremo, per un'altra ragione). Se numerose generazioni successive si crogiolano al sole dei tropici, esse diventeranno sempre più scure poiché, secondo la teoria lamarckiana, ogni generazione erediterà un po' dell'abbronzatura della generazione precedente. Col tempo i bambini

nasceranno già neri (altra cosa che avviene realmente, ma anche in questo caso non per la ragione lamarckiana).

Gli esempi tradizionali sono le braccia del fabbro e il collo della giraffa. In villaggi in cui il lavoro del fabbro si trasmetteva tradizionalmente di padre in figlio, si pensava che il fabbro avesse ereditato dal padre, oltre all'officina, anche i muscoli ben sviluppati, come questi doveva averli ereditati dal nonno e così via.

E non solo che li avesse ereditati, ma che vi aggiungesse attraverso l'esercizio anche qualcosa di suo, per passare poi anche i miglioramenti al figlio, destinato a proseguire l'attività. Le giraffe ancestrali dal collo corto avevano un disperato bisogno di brucare le foglie degli alberi, che erano poste però troppo in alto per poterle raggiungere comodamente. Esse dovevano perciò sforzarsi per raggiungerle, sollevando in tal modo i muscoli e le ossa del collo. Ogni generazione finiva perciò con l'avere un collo leggermente più lungo rispetto alla generazione precedente, e trasmetteva alla generazione successiva il miglioramento in tal modo conseguito. Ogni progresso evolutivo, secondo la teoria lamarckiana pura, segue questo modello. L'animale si sforza per conseguire qualcosa di cui ha bisogno. Le parti del corpo così sollecitate si sviluppano o si modificano in altro modo nella direzione appropriata. Il mutamento viene ereditato dalla generazione seguente e così continua il processo. Questa teoria presenta il vantaggio di essere cumulativa: un ingrediente essenziale di qualsiasi teoria dell'evoluzione che debba assolvere il suo ruolo nella nostra visione del mondo, come abbiamo visto.

La teoria lamarckiana sembra esercitare una grande attrazione emotiva su certi tipi di intellettuali oltre che sui profani. Una volta fui avvicinato da un collega, famoso storico marxista, uomo molto colto e di molte letture. Egli capiva, disse, che i fatti sembravano essere tutti contro la teoria lamarckiana, ma non c'era veramente alcuna speranza che potesse essere vera? Io gli dissi che a mio giudizio non esisteva alcuna possibilità, ed egli accettò la mia opinione con sincero rincrescimento, dicendo che, per ragioni ideologiche avrebbe preferito che il lamarckismo fosse vero. Esso sembrava offrire speranze molto positive per il miglioramento dell'umanità. George Bernard Shaw dedicò una delle sue enormi prefazioni (in *Torniamo a Matusalemme*) a una difesa appassionata dell'ereditarietà dei caratteri acquisiti. La sua difesa si fondava non su conoscenze biologiche, che ammetteva di buon grado di non avere, bensì su un'avversione emotiva per le implicazioni del darwinismo, quella serie di casi fortuiti: Come tale, appare semplice, perché dapprima non ci si rende conto di ciò che implica. Ma quando tutto il suo significato si fa strada in noi, il cuore sprofonda in noi in un mucchio di sabbia.

Ve un odioso fatalismo che lo riguarda, una spaventosa e maledetta riduzione di bellezza e intelligenza, di forza e scopo, di onore e d'aspirazione [...].

Arthur Koestler fu un altro famoso uomo di lettere che non riuscì ad accettare quelle che gli parevano le implicazioni del darwinismo. Come si è espresso maliziosamente ma correttamente Stephen J. Gould, nei suoi ultimi sei libri Koestler condusse «una campagna contro il proprio fraintendimento del darwinismo». Egli cercò rifugio in un'alternativa che non mi fu mai perfettamente chiara, ma che può essere interpretata come una versione oscura del lamarckismo. Koestler e Shaw erano individualisti che avevano opinioni personali sulle cose. Le loro riflessioni eccentriche sull'evoluzione non hanno esercitato probabilmente una grande influenza, anche se ricordo, con vergogna, che il mio apprezzamento del darwinismo, quando ero un ragazzo, fu ritardato per almeno un anno dall'affascinante retorica di Shaw in *Torniamo a Matusalemme*. Il richiamo emotivo del lamarckismo, e l'ostilità emotiva al darwinismo ad esso associata, ha esercitato a volte un impatto più nefasto attraverso ideologie usate come surrogato del pensiero.

T.D. Lysenko era un agronomo di seconda categoria che non aveva doti di rilievo se non nel campo della politica. Il suo fanatismo antimendeliano e la sua fede ardente e dogmatica nell'ereditarietà dei caratteri acquisiti sarebbero stati ignorati senza danno nella maggior parte dei paesi civilizzati.

Purtroppo egli visse in un paese in cui l'ideologia era più importante della verità scientifica.

Nominato, nel 1940, direttore dell'Istituto di Genetica dell'Unione Sovietica, divenne estremamente influente. Le sue opinioni sbagliate sulla genetica furono per una generazione le uniche che potessero essere insegnate nelle scuole sovietiche. I danni arrecati all'agricoltura sovietica furono

incalcolabili. Molti eminenti genetisti sovietici furono messi al bando, esiliati o incarcerati. Per esempio, I. Vavilov, un genetista di fama mondiale, morì di malnutrizione in una cella senza finestre dopo un lungo processo: Vavilov fu giudicato colpevole di accuse ridicole; come quella di «spionaggio a favore dei britannici».

È impossibile dimostrare che caratteri acquisiti non vengano mai ereditati. Per la stessa ragione non potremo mai dimostrare che le fate non esistono. Tutto ciò che possiamo dire è che nessun «avvistamento» di fate è mai stato confermato e che le presunte fotografie di fate che sono state presentate sono chiari falsi. Lo stesso vale per le presunte orme umane in giacimenti di fossili di dinosauri nel Texas. Qualsiasi affermazione categorica che io facessi sull'inesistenza delle fate sarebbe sempre soggetta a essere un giorno smentita dall'apparizione di un'eterea personcina alata in fondo al mio giardino. Lo stesso vale per la teoria dell'ereditarietà dei caratteri acquisiti. Quasi tutti i tentativi di dimostrare questo effetto sono semplicemente falliti. Fra quelli che hanno avuto successo, alcuni sono risultati falsi; per esempio la nota iniezione di inchiostro di china sotto la pelle dell'alite ostetrico, raccontata da Arthur Koestler nel Caso del rospo ostetrico. Gli altri non hanno potuto essere replicati da altri ricercatori. Nondimeno, come un giorno qualcuno potrebbe vedere una fata in fondo al suo giardino mentre è sobrio e ha una macchina fotografica a portata di mano, qualcun altro potrebbe dimostrare che i caratteri acquisiti possono essere trasmessi in eredità ai propri discendenti.

Su questo argomento si può dire però anche qualcos'altro. Ci sono cose che non sono mai state attendibilmente osservate ma che sono nondimeno credibili, purché non mettano in discussione altre cose che noi conosciamo già come certe. Io non ho mai visto alcuna prova attendibile a sostegno della teoria che dei plesiosauri vivano oggi nel Loch Ness ma, nell'eventualità che se ne trovasse uno, la mia visione del mondo non ne sarebbe scossa. Ne sarei solo sorpreso (e deliziato), poiché non si conosce alcun fossile di plesiosauro negli ultimi 60 milioni di anni, e questo sembra un periodo molto lungo per la sopravvivenza di una piccola popolazione relitta. In questo caso non sarebbe però in gioco alcun grande principio scientifico. Questa sarebbe semplicemente una questione di fatto. D'altra parte la scienza ha accumulato una buona comprensione di come funziona il mondo, una comprensione che si rivela adeguata per una varietà immensa di fenomeni, e ci sono asserzioni che sembrerebbero incompatibili, o almeno molto difficili da riconciliare, con questa comprensione. Ciò vale per esempio per l'affermazione, che a volte viene fatta sulla base di motivi biblici spuri, che l'universo fu creato in soli 6000 anni circa. Questa teoria non solo non è convalidata ma è incompatibile, non soltanto con la biologia e con la geologia ortodosse, bensì anche con la teoria fisica della radioattività e con la cosmologia (se non esistesse nulla di età superiore a 6000 anni, non sarebbero visibili corpi celesti a distanze superiori a 6000 anni-luce; non dovremmo essere in grado di osservare la Via Lattea, e neppure nessuna dei 100.000 milioni di galassie la cui esistenza è riconosciuta dalla moderna cosmologia).

È già accaduto nella storia della scienza che l'intera scienza ortodossa sia stata rovesciata in conseguenza di un singolo fatto inspiegabile. Sarebbe arroganza sostenere che sconvolgimenti del genere non accadranno mai più. Prima però di accettare un fatto capace di sconvolgere un edificio scientifico consolidato, noi esigiamo naturalmente, e giustamente, un livello di autenticazione superiore a quello che chiediamo prima di accettare un fatto che, benché sorprendente, può conciliarsi senza difficoltà con la scienza esistente. Per un plesiosauro nel Loch Ness io sarei disposto ad accettare la conferma dei miei occhi. Se vedessi un uomo levitare in aria, prima di rifiutare l'intero corpus della fisica sospetterei di essere vittima di un'allucinazione o di un trucco architettato a bella posta. C'è un continuum dalle teorie che probabilmente non sono vere ma potrebbero esserlo alle teorie che potrebbero essere vere solo a costo di distruggere grandi edifici della scienza ortodossa finora perfettamente adeguati a spiegare la realtà.

Ora, dove si colloca il lamarckismo in questo continuum? Esso viene presentato di solito come appartenente al gruppo di quelle teorie che «non sono vere ma potrebbero benissimo esserlo». Io vorrei sostenere invece che il lamarckismo, o più specificamente l'ereditarietà dei caratteri acquisiti, pur non appartenendo alla stessa classe della levitazione per effetto della preghiera, sia più vicino all'estremo del continuo in cui si colloca la levitazione che non all'altro estremo, cui appartiene il

mostro di Loch Ness.

L'ereditarietà dei caratteri acquisiti non è una di quelle cose che non sono vere ma potrebbero benissimo esserlo. Io sosterrò che essa potrebbe essere vera solo al costo di rinunciare a uno dei principi più incontrastati e di maggior successo dell'embriologia.

Il lamarckismo dev'essere sottoposto perciò a un livello di critica più approfondito di quello che si riserva di solito al «mostro di Loch Ness». Qual è, dunque, questo principio embriologico ampiamente accettato e di grande successo cui si dovrebbe rinunciare per poter accettare il lamarckismo? Questo problema richiede una breve spiegazione. La spiegazione sembrerà una digressione, ma la sua pertinenza risulterà infine chiara. E si ricordi che tutto questo va chiarito prima ancora di affrontare il ragionamento che il lamarckismo, anche se fosse vero, sarebbe ancora incapace di spiegare l'evoluzione della complessità adattiva.

Il campo di cui si tratta, quindi, è l'embriologia. C'è stata tradizionalmente una divisione profonda fra due atteggiamenti diversi circa il modo in cui la singola cellula si trasforma in un organismo adulto. I nomi ufficiali di questi due orientamenti sono preformazionismo ed «epigenesi», ma nelle loro forme moderne li chiamerò teoria del progetto e teoria della ricetta. Gli antichi preformazionisti pensavano che il corpo adulto fosse preformato nella singola cellula da cui doveva svilupparsi. Uno di loro si convinse di aver visto al microscopio un omino in miniatura - un homunculus -, rannicchiato in uno spermatozoo (non in un ovulo!).

Lo sviluppo embrionale, per l'homunculus, era semplicemente un fatto di accrescimento. Era presumibile che ogni homunculus maschile avesse i suoi spermatozoi ultraminiaturizzati, in cui erano rannicchiati i suoi figli, ciascuno dei quali doveva contenere rannicchiati in sé i suoi nipotini... A prescindere da questo problema del regresso infinito, il preformazionismo ingenuo trascurava il fatto - non meno ovvio nel Seicento di quanto lo sia oggi che i figli ereditano i loro caratteri dalla madre non meno che dal padre. È vero che c'erano altri fautori del preformazionismo, chiamati «ovisti» - per la verità un po' più numerosi degli «spermisti» - i quali credevano che l'adulto fosse preformato non nello spermio bensì nell'ovulo. Ma anche l'ovismo presta il fianco agli stessi due problemi dello spermismo.

Il preformazionismo moderno non soffre di nessuno di questi due problemi, ma è nondimeno ancora sbagliato. Questo indirizzo - la «teoria del progetto» - ritiene che il dna presente in un uovo fecondato equivalga a un progetto del corpo adulto. Un progetto è una rappresentazione in scala ridotta della cosa reale. La cosa reale - una casa, un'autovettura o qualsiasi altra cosa - è un oggetto tridimensionale, mentre un progetto è bidimensionale. È possibile rappresentare un oggetto tridimensionale come un edificio per mezzo di un insieme di sezioni bidimensionali: una pianta di ogni piano, vari alzati e via dicendo. Questa riduzione in dimensioni è un fatto di comodità. Gli architetti potrebbero benissimo fornire ai costruttori modellini tridimensionali di edifici fatti di fiammiferi e di legno di balsa, ma un insieme di modelli bidimensionali su carta - progetti - è più facile da portare in giro in una cartella e da correggere, e fornisce più facilmente informazioni. Un'ulteriore riduzione a una dimensione è indispensabile se i progetti devono essere memorizzati in un codice a impulsi in un computer e, per esempio, trasmessi per mezzo di una linea telefonica in un'altra parte del paese. Questa trasmissione ha luogo facilmente previa ricodificazione di ogni progetto bidimensionale in un'«analisi» monodimensionale. Le immagini televisive vengono codificate in questo modo per essere trasmesse per mezzo di onde elettromagnetiche. Ancora una volta, la compressione dimensionale è un modo di codificazione essenzialmente banale. Il punto importante è che continui a sussistere una corrispondenza biunivoca fra progetto e edificio. Ogni parte del progetto corrisponde a una parte dell'edificio. C'è un senso in cui il progetto è un edificio «preformato» in miniatura, anche se la rappresentazione in scala dell'edificio può essere ricodificata in un numero di dimensioni minore di quello dell'edificio reale.

La ragione che mi ha indotto a menzionare la riduzione dei progetti a una dimensione è, ovviamente, che il dna è un codice monodimensionale. Proprio come è teoricamente possibile trasmettere un modello in scala di un edificio ridotto alla monodimensionalità attraverso una linea telefonica - un insieme di progetti tradotti in numeri -, così è teoricamente possibile trasmettere un corpo ridotto in scala attraverso il codice digitale monodimensionale del dna. Questo fatto non

accade ma, se accadesse, sarebbe giusto dire che la moderna biologia molecolare ha fornito una giustificazione dell'antica teoria del preformazionismo. Consideriamo ora l'altra grande teoria dell'embriologia, l'epigenesi, la teoria della ricetta o del «libro di cucina».

Una ricetta in un libro di cucina non è, in alcun senso, un progetto per la torta che uscirà infine dal forno. Non perché la ricetta è una sequenza monodimensionale di parole, mentre la torta è un oggetto tridimensionale. Come abbiamo visto, è perfettamente possibile, per mezzo di un procedimento di analisi, comprimere un modello in scala in un codice monodimensionale.

Ma una ricetta non è un modello in scala, né una descrizione di una torta quale esce dal forno, né in alcun senso una rappresentazione punto per punto. È un insieme di istruzioni che, se seguite nel giusto ordine, daranno come risultato una torta. Un vero progetto di una torta codificato in una dimensione consterebbe di una serie di esplorazioni della torta, come se uno spiedo venisse passato ripetutamente attraverso di essa in una sequenza ordinata. A intervalli di millimetri gli immediati dintorni dello spiedo sarebbero memorizzati in codice, cosicché, per esempio, dai dati seriali sarebbero recuperabili le coordinate esatte di ogni uvetta e di ogni briciola. Ci sarebbe una rigorosa corrispondenza biunivoca fra ogni parte della torta e la parte corrispondente del progetto. È ovvio che questo procedimento non ha nulla di simile a una vera ricetta. In una ricetta non c'è una rigorosa corrispondenza biunivoca fra ogni parte della torta e parole o lettere della ricetta. Se le parole della ricetta rappresentano qualcosa, non sono singoli pezzi della torta quale esce dal forno, bensì singoli passi nel procedimento di fare una torta.

Noi oggi non comprendiamo ancora tutto, e neppure la maggior parte delle cose, su come da un uovo fecondato si sviluppi un animale. Ci sono nondimeno indicazioni molto persuasive del fatto che i geni sono molto più simili a una ricetta che non a un progetto. In effetti l'analogia della ricetta è piuttosto buona, mentre l'analogia del progetto, pur essendo spesso usata senza troppa riflessione in testi elementari, specialmente in libri recenti, è sbagliata in quasi tutti i particolari. Lo sviluppo embrionale è un processo. Esso è una sequenza ordinata di eventi, come il procedimento per fare una torta, con la differenza che nel corso di questo processo c'è un numero di passi di molti milioni di volte maggiore e che molti di tali passi hanno luogo simultaneamente in molte parti diverse dell'embrione. La maggior parte dei casi implicano la moltiplicazione cellulare, la quale genera un numero prodigioso di cellule, alcune delle quali muoiono, mentre altre si uniscono fra loro a formare organi, tessuti e altre strutture pluricellulari. Come abbiamo visto in un capitolo precedente, il comportamento di una particolare cellula dipende non dai geni che essa contiene - poiché tutte le cellule in un corpo contengono lo stesso corredo di geni - bensì da quale preciso sottoinsieme di geni sia attivato in essa. In qualsiasi parte in un corpo in sviluppo, in tempi diversi durante lo sviluppo, saranno attivati insiemi di geni diversi. Quali geni, esattamente, siano attivati in una data cellula in un dato tempo dipende dalle condizioni chimiche vigenti in tale cellula. Queste dipendono, a loro volta, dalle condizioni anteriori in quella parte dell'embrione.

Inoltre l'effetto che un gene esercita quando è attivato dipende da ciò su cui può influire nella parte locale dell'embrione in cui si trova. Un gene attivato in una cellula alla base del midollo spinale nella terza settimana di sviluppo avrà un effetto totalmente diverso rispetto allo stesso gene attivato nelle cellule della spalla nella sedicesima settimana di sviluppo. Così l'effetto di un gene, quando viene esercitato, non è una semplice proprietà del gene stesso, ma è una proprietà del gene nell'interazione con la storia recente dei suoi dintorni immediati nell'embrione.

Questo fatto dimostra l'assurdità dell'idea che i geni siano qualcosa di simile a un progetto per un corpo. Questa stessa conclusione valeva, come il lettore ricorderà, anche per i biomorfi nel nostro programma per computer.

Non esiste, quindi, una semplice corrispondenza biunivoca fra i geni e parti del corpo, così come non esiste fra parole della ricetta e briciole di torta. I geni, considerati nel loro insieme, possono essere concepiti come una serie di istruzioni per eseguire un processo, esattamente come lo sono, considerate nel loro insieme, le parole di una ricetta. Il lettore potrebbe chiedersi allora come, stando così le cose, i genetisti riescano a guadagnarsi da vivere. Com'è possibile non solo far ricerche, ma persino parlare su un gene «per» gli occhi azzurri, o di un gene «per» l'acromatopsia (o cecità ai colori)? Il fatto stesso che il genetista possa studiare tali effetti di geni singoli non

suggerisce che ci sia in realtà una qualche sorta di precisa corrispondenza biunivoca fra un gene e una parte del corpo? E questo fatto non confuta tutto ciò che ho detto sul corredo genico come ricetta per sviluppare un corpo? La risposta è: no, sicuramente no, ed è importante capire perché. Il modo migliore per capirlo è forse quello di tornare all'analogia della ricetta. Il lettore sarà d'accordo che non si può dividere una torta nei suoi componenti e dire: «Questa briciola corrisponde alla prima parola nella ricetta, questa briciola corrisponde alla seconda parola nella ricetta» e così via. In questo senso il lettore accetterà la tesi che l'intera ricetta rappresenterà l'intera torta. Ma supponiamo ora di modificare un'espressione nella ricetta; per esempio, supponiamo di cancellare «lievito in polvere» o di sostituirlo con «lievito di birra». Ora facciamo 100 torte secondo la nuova versione della ricetta e 100 torte secondo la vecchia versione. Fra i due gruppi di 100 torte c'è una differenza chiave, e questa differenza è dovuta a una differenza precisa nella formulazione della ricetta. Benché non ci sia una corrispondenza biunivoca fra l'espressione modificata e una briciola di torta, c'è però una corrispondenza biunivoca fra la differenza in una precisa espressione e la differenza dell'intera torta. L'espressione «lievito in polvere» non corrisponde ad alcuna parte precisa della torta: la sua influenza incide sulla lievitazione, e quindi sulla forma finale dell'intera torta. Se si cancella l'espressione «lievito in polvere», o la si sostituisce con «farina», la torta non lieviterà.

Se la si sostituisce con «lievito di birra» la torta lieviterà, ma il suo sapore assomiglierà più a quello del pane. Ci sarà una differenza costante, identificabile, fra le torte fatte secondo la versione originaria della ricetta e quelle fatte secondo le versioni «mutate», anche se non c'è nessuna parte di nessuna torta che corrisponda alle parole in questione. Questa è una buona analogia per ciò che accade quando muta un gene.

Un'analogia ancora migliore, dato che i geni esercitano effetti quantitativi e che le mutazioni modificano la grandezza quantitativa di quegli effetti, sarebbe un mutamento dalla temperatura di «180 gradi» a quella di «230 gradi». Le torte cotte secondo la versione «mutata» della ricetta, a temperatura superiore, risulteranno diverse, non solo in una parte, ma nell'intera loro sostanza, dalle torte cotte secondo la versione originaria a temperatura inferiore. Ma l'analogia è ancora troppo semplice. Per simulare lo sviluppo embrionale a imitazione della cottura di una torta, dovremmo immaginare non un singolo processo in un singolo forno, bensì un intrico di nastri trasportatori che fanno passare varie parti della «torta» attraverso 10 milioni di forni miniaturizzati diversi, in serie e in parallelo, ciascuno dei quali realizza una diversa combinazione di sapori a partire da 10.000 ingredienti di base. Il succo dell'analogia con la ricetta - ossia il fatto che i geni non sono un progetto bensì una ricetta per un processo - viene evidenziato ancor più dalla versione complessa dell'analogia che da quella semplice.

È ora il momento di applicare questa lezione al problema dell'ereditarietà dei caratteri acquisiti. La cosa importante nella costruzione di qualcosa da un progetto, in contrapposizione a una ricetta, è che il processo è reversibile. Se si ha una casa, è facile ricostruire il progetto. A questo scopo è sufficiente misurare tutte le dimensioni e rappresentarle in scala ridotta. Ovviamente, se la casa dovesse «acquistare» una qualsiasi caratteristica - per esempio se venisse abbattuto un muro interno per ottenere una stanza più spaziosa -, questo «progetto a rovescio» dovrebbe registrare fedelmente il mutamento. Lo stesso varrebbe nel caso che i geni fossero una descrizione del corpo adulto. Se i geni fossero un progetto, sarebbe facile immaginare che qualsiasi carattere che un corpo acquistasse nel corso della sua vita venisse fedelmente ritrascritto nel codice genetico e di qui trasmesso alla generazione seguente. Il figlio del fabbro potrebbe ereditare veramente le conseguenze dell'esercizio fisico del padre. Proprio perché i geni non sono un progetto bensì una ricetta, ciò non è possibile. Noi non possiamo immaginare che i caratteri acquisiti vengano trasmessi da una generazione alla successiva più di quanto possiamo immaginare l'esempio seguente. Una descrizione del mutamento viene ora reintrodotta nella ricetta e la ricetta cambia in modo tale che la torta seguente, cotta seguendo la ricetta modificata, esce dal forno con una fetta già mancante. I lamarckiani sono tradizionalmente innamorati dei calli cosicché useranno questo esempio. Il nostro ipotetico impiegato di banca ha mani lisce, dalla pelle delicata, con la sola eccezione di un duro callo sul dito medio della mano destra, in conseguenza dell'uso diuturno della penna. Se i suoi

discendenti, per varie ragioni, scrivono tutti molto, il lamarckiano si attende che i geni che controllano lo sviluppo della pelle in quella parte della mano saranno alterati in modo tale che i neonati nasceranno col dito medio già indurito. Se i geni fossero un progetto, questa sarebbe una cosa facile. Ci sarebbe un gene «per» ogni millimetro quadrato (o per ogni piccola unità di superficie appropriata) di pelle. L'intera superficie della pelle di un impiegato di banca adulto sarebbe «analizzata» e il grado di durezza di ciascun millimetro quadrato sarebbe registrato con cura e reimmesso nei geni «per» quel particolare millimetro quadrato, e in particolare nei geni appropriati nei suoi spermatozoi.

Ma i geni non sono un progetto. Non ha senso pensare che possa esistere un gene «per» ciascun millimetro quadrato, così come non ha senso l'idea che il corpo dell'adulto potrebbe essere analizzato e la sua descrizione reimmessa nei geni. Le «coordinate» di un callo non potrebbero essere «cercate» nella documentazione genetica né ci sarebbe alcuna possibilità di alterare i geni «appropriati». Lo sviluppo embrionale è un processo a cui partecipano tutti i geni funzionanti; un processo che, se eseguito correttamente nella giusta direzione, darà un corpo adulto; ma è anche un processo che, per sua stessa natura, è intrinsecamente irreversibile. L'eredità dei caratteri acquisiti non solo non ha luogo, ma non potrebbe aver luogo in alcuna forma di vita il cui sviluppo fosse epigenetico anziché preformazionistico.

Qualsiasi biologo fautore del lamarckismo, per quanto possa essere turbato nel sentirselo dire, è implicitamente un sostenitore di un'embriologia atomistica, deterministica, riduzionistica.

Non volevo tediare il lettore generico con questo piccolo elenco di pretenziose parole di gergo, ma non ho potuto resistere all'ironia della situazione, giacché oggi i biologi più vicini a simpatizzare col lamarckismo sono anche quelli che usano più volentieri queste stesse parole gergali nel criticare altri.

Non intendo dire con questo che, da qualche parte nell'universo, non possa esserci un qualche sistema di vita alieno in cui l'embriologia sia preformazionistica; una forma di vita che abbia realmente una «genetica per progetti» e nella quale, quindi, sia realmente possibile un'ereditarietà dei caratteri acquisiti.

Tutto ciò che ho mostrato finora è che il lamarckismo è incompatibile con l'embriologia quale la conosciamo. La mia tesi, all'inizio di questo capitolo, era però in realtà più forte: ossia che, quand'anche i caratteri acquisiti potessero essere trasmessi in eredità, la teoria lamarckiana sarebbe ancora incapace di spiegare l'evoluzione adattiva. Questa tesi è così forte che intendo suggerirne l'applicazione a ogni forma di vita, dappertutto nell'universo. Essa si fonda su due linee di argomentazione, una concernente le difficoltà connesse al principio di uso e disuso, e l'altra attinente agli ulteriori problemi legati all'ereditarietà dei caratteri acquisiti. Presenterò ora queste due linee di ragionamento in ordine inverso.

Il problema, nel caso dei caratteri acquisiti, è fondamentalmente questo. L'ereditarietà dei caratteri acquisiti va bene, ma non tutti i caratteri acquisiti sono miglioramenti. In realtà per la grande maggioranza sono ferite. È chiaro che se l'evoluzione ereditasse in modo indiscriminato i caratteri acquisiti, se gambe rotte e cicatrici di vaiolo venissero trasmesse da una generazione all'altra come la pelle indurita della pianta dei piedi e la pelle abbronzata dal sole, non si avrebbe certo un progresso nella direzione generale del miglioramento adattivo. La maggior parte dei caratteri che una qualsiasi macchina acquista invecchiando tendono a essere un accumulo delle devastazioni del tempo: la macchina si logora. Se questi caratteri venissero raccolti in virtù di una qualche sorta di processo di analisi e immessi nel progetto per la generazione seguente, le generazioni successive diventerebbero sempre più decrepite. Anziché prendere ogni volta l'avvio con un progetto nuovo, ogni nuova generazione comincerebbe la vita impacciata e segnata dal decadimento e dalle lesioni accumulate dalle generazioni precedenti.

Questo problema non è necessariamente insuperabile. È innegabile che alcuni caratteri acquisiti siano miglioramenti, ed è teoricamente concepibile che il meccanismo di trasmissione ereditaria sia in qualche modo in grado di discriminare i miglioramenti dalle menomazioni. Ma nel chiederci in che modo questa discriminazione potrebbe funzionare, siamo ora indotti a domandarci perché a volte i caratteri acquisiti siano miglioramenti. Perché, per esempio, le aree di pelle che vengono

usate sovente, come la pianta del piede di una persona abituata a correre a piedi scalzi, diventano più spesse e dure? Sembrerebbe infatti più probabile che la pelle dovesse diventare più sottile, per l'ovvia ragione che l'usura toglie particelle piuttosto che aggiungerne.

Il darwiniano, ovviamente, ha una risposta pronta. La pelle che è soggetta a usurarsi e a lacerarsi diventa più spessa perché la selezione naturale nel passato ancestrale ha favorito quegli individui la cui pelle rispondeva all'usura e alle lacerazioni in questo modo vantaggioso. Similmente, la selezione naturale ha favorito quei membri di generazioni ancestrali che rispondevano alla radiazione solare acquistando una colorazione della pelle più scura. Il darwiniano sostiene che l'unica ragione per cui persino una minoranza di caratteri acquisiti sono miglioramenti consiste nel fatto che su tali caratteri ha agito la selezione naturale darwiniana. In altri termini, la teoria lamarckiana può spiegare il miglioramento adattivo nell'evoluzione solo cavalcando, per così dire, la teoria darwiniana. Data la selezione darwiniana per assicurare che qualche carattere acquisito sia vantaggioso e per fornire un meccanismo per discriminare fra acquisizioni vantaggiose e svantaggiose, è concepibile che la trasmissione ereditaria di caratteri acquisiti possa condurre a qualche miglioramento evolutivo. Ma il miglioramento, in quanto tale, sarebbe dovuto per intero al supporto della selezione darwiniana. Noi siamo costretti a far ricorso al darwinismo per spiegare l'aspetto adattivo dell'evoluzione.

Lo stesso vale per una classe un po' più importante di miglioramenti acquisiti, quelli che raccogliamo assieme sotto l'etichetta di apprendimento. Nel corso della sua vita un animale diventa più abile nel compito di assicurarsi la sopravvivenza. Esso impara ciò che è buono per sé e ciò che non lo è. Il suo cervello memorizza un grande archivio di ricordi sul suo mondo, e su quali azioni tendano a condurre a conseguenze desiderabili, e quali a conseguenze indesiderabili. Gran parte del comportamento di un animale si colloca, perciò, nella rubrica dei caratteri acquisiti, e gran parte di questo tipo di acquisizione - «apprendimento» merita veramente la qualifica di miglioramento. Se i genitori potessero trascrivere in qualche modo nei loro geni il sapere dell'esperienza di una vita, così che i loro figli nascessero con un archivio già formato di esperienza sussidiaria incorporata a cui poter attingere immediatamente, ogni generazione potrebbe cominciare la propria esistenza da un gradino più in alto. Il progresso evolutivo potrebbe avere un ritmo davvero accelerato, poiché abilità apprese e sapere sarebbero già incorporati nei geni.

Ma tutto questo presuppone che i mutamenti nel modo di comportarsi che noi chiamiamo apprendimento siano davvero dei miglioramenti. Ma perché dovrebbero essere necessariamente miglioramenti? Gli animali, in effetti, imparano a fare ciò che per loro è un bene piuttosto che ciò che è un male, ma perché?

Gli animali tendono a evitare le azioni che, in passato, hanno condotto a dolore. Ma il dolore non è una sostanza. Il dolore è solo ciò che il cervello considera dolore. È una fortuna che quegli accadimenti che sono considerati dolorosi, per esempio una violenta puntura sulla superficie del corpo, siano anche quelli che tendono a mettere in pericolo la sopravvivenza dell'individuo. Ma noi potremmo immaginarci facilmente una razza di animali che provassero piacere per le ferite e per altri accadimenti pericolosi per la loro sopravvivenza; una razza di animali il cui cervello fosse costruito in modo tale da godere per le ferite e sentire come dolorosi quegli stimoli, come il sapore di cibi ricchi di nutrimento, che sono favorevoli per la loro sopravvivenza. La ragione per cui noi nel mondo non vediamo cosiffatti animali masochisti è la ragione darwiniana che i progenitori masochisti, per ragioni ovvie, non sarebbero sopravvissuti a lasciare discendenti cui trasmettere il loro masochismo. Noi potremmo probabilmente, per mezzo di una selezione artificiale in gabbie imbottite, in condizioni protette in cui la sopravvivenza fosse assicurata da gruppi di veterinari e di sorveglianti, produrre una razza di masochisti ereditari. In natura, però, tali masochisti non sopravviverebbero, e questa è la ragione fondamentale per cui i mutamenti che noi chiamiamo apprendimento tendono a essere miglioramenti piuttosto che l'opposto. Siamo pervenuti di nuovo alla conclusione che debba esserci un supporto darwiniano per assicurare che i caratteri acquisiti siano vantaggiosi.

Passiamo ora a considerare il principio dell'uso e disuso.

Questo principio sembra funzionare piuttosto bene per alcuni aspetti dei miglioramenti acquisiti. È

questa una regola generale che non dipende da particolari specifici. La regola dice semplicemente: «Ogni parte del corpo che viene usata spesso dovrebbe accrescere le sue dimensioni; ogni parte che non viene usata dovrebbe diventare più piccola o addirittura andare perduta completamente».

Poiché possiamo attenderci che le parti utili (e perciò presumibilmente più usate) del corpo in generale trarranno beneficio dal fatto di accrescere le proprie dimensioni, mentre le parti inutili (e perciò presumibilmente non usate) potrebbero mancare del tutto senza alcun danno per l'individuo, la regola sembra avere un qualche merito generale. Nondimeno c'è un grande problema sul principio dell'uso e disuso.

Questo è che, quand'anche non ci fosse alcun'altra obiezione contro tale principio, esso sarebbe comunque uno strumento troppo rozzo per poter produrre gli adattamenti squisitamente delicati che noi vediamo realmente negli animali e nelle piante.

L'occhio è già stato un esempio utile; perché dunque non usarlo ancora? Pensiamo a tutte le parti che presentano una cooperazione complessa fra loro: il cristallino con la sua perfetta trasparenza, la sua correzione dell'aberrazione cromatica e la sua correzione della distorsione sferica; i muscoli che sono in grado di mettere a fuoco istantaneamente qualsiasi oggetto, da pochi centimetri all'infinito; la pupilla o «diaframma» dell'iride, che regola di continuo in modo fine l'apertura dell'occhio, come una macchina fotografica con esposimetro incorporato e computer specializzato veloce; la retina, con i suoi 125 milioni di fotocellule capaci di codificare il colore; la rete fine di vasi sanguigni che irrorano ogni parte della macchina; la rete ancora più fine dei nervi: l'equivalente di fili elettrici e di chip elettronici.

Avendo ben presente tutta questa complessità finemente articolata, chiediamo a noi stessi se avrebbe potuto essere costruita in virtù del semplice principio di uso e disuso. La risposta, mi pare, non può essere che un chiaro «no».

Il cristallino è trasparente e corretto contro l'aberrazione sferica e cromatica. Una cosa del genere avrebbe potuto avere origine attraverso il mero uso? Un cristallino può essere reso trasparente dal volume di fotoni che lo attraversano? Esso diventerà una lente migliore per il fatto che viene usato, che attraverso di esso passa della luce? Ovviamente no. Perché mai dovrebbe? Le cellule della retina possono suddividersi in tre classi sensibili a colori diversi semplicemente perché sono bombardate da luce di colori differenti? Ancora una volta, perché mai dovrebbero? Una volta che i muscoli addetti alla messa a fuoco esistono, è vero che l'esercizio li renderà più grossi e più robusti, ma questo fatto di per sé non sarà sufficiente a migliorare la messa a fuoco. La verità è che il principio di uso e disuso è incapace di andar oltre gli adattamenti più rozzi e insignificanti.

La selezione darwiniana, invece, non ha alcuna difficoltà a spiegare ogni benché minimo dettaglio. Una buona vista, accurata e precisa fino ai particolari più insignificanti, può essere per un animale una questione di vita o di morte. Una lente cristallina, con un'appropriata messa a fuoco e una correzione adeguata delle aberrazioni, può fare tutta la differenza, per un uccello così veloce nel volo come una rondine, fra catturare un insetto e andare a spiacciarsi contro una scogliera. Una pupilla capace di chiudersi rapidamente quando l'occhio è investito dal sole può fare tutta la differenza per un animale fra vedere in tempo un predatore e fuggire o essere abbagliato per un istante fatale. Ogni miglioramento nel funzionamento di un occhio, per quanto sottile e per quanto confinato in tessuti interni profondi, può contribuire alla sopravvivenza e al successo riproduttivo dell'animale, e quindi alla propagazione dei geni che apportarono quel miglioramento. Perciò la selezione darwiniana spiega l'evoluzione degli apparati che hanno successo ai fini della sopravvivenza come conseguenza diretta del loro stesso successo.

L'accoppiamento fra la spiegazione e ciò che dev'essere spiegato è diretto e minuzioso.

La teoria lamarckiana si fonda d'altra parte su un accoppiamento molto vago e rozzo: la regola che tutto ciò che è usato molto migliori aumentando di dimensioni. Ciò equivale a istituire una correlazione fra le dimensioni di un organo e la sua efficacia. Se una tale correlazione esiste, è senza dubbio assai debole. La teoria darwiniana si fonda di fatto su una correlazione fra l'efficacia di un organo e la propria efficacia: una correlazione necessariamente perfetta! Questa debolezza della teoria lamarckiana non dipende da fatti dettagliati sulle particolari forme di vita che vediamo su questo pianeta. È una debolezza generale che si applica a ogni sorta di complessità adattiva, e io

penso che debba applicarsi alla vita di ogni luogo dell'universo, per quanto estranei e strani possano essere i particolari di tale vita.

La nostra confutazione del lamarckismo è, quindi, un po' devastante. Innanzitutto il suo assunto chiave, quello dell'ereditarietà dei caratteri acquisiti, sembra falso in tutte le forme di vita che abbiamo studiato. In secondo luogo, non è solo falso ma deve essere falso in ogni forma di vita che si fondi su un tipo di embriologia epigenetico (teoria della «ricetta») anziché preformazionistico (teoria del «progetto»), e queste forme di vita comprendono tutte quelle che abbiamo studiato. In terzo luogo, quand'anche gli assunti della teoria lamarckiana fossero veri, la teoria è in linea di principio, per due ragioni del tutto distinte, incapace di spiegare l'evoluzione di una complessità adattiva seria, non solo su questa Terra ma in qualsiasi luogo dell'universo.

La teoria lamarckiana non è dunque una teoria - sbagliata - rivale di quella darwiniana; essa non è affatto una rivale del darwinismo. Non è neppure una seria candidata come spiegazione dell'evoluzione della complessità adattiva. Essa è condannata sin dal principio come potenziale rivale del darwinismo.

Ci sono alcune altre teorie che sono state proposte, e occasionalmente vengono ancora proposte, come alternative alla selezione darwiniana. Ancora una volta mostrerò che in realtà non sono affatto alternative serie. Mostrerò (come è realmente ovvio) che queste «alternative» - «neutralismo», «mutazionismo» e via dicendo - possono essere o non essere in qualche misura responsabili del mutamento evolutivo osservato, ma che non possono essere certamente responsabili del mutamento evolutivo adattivo, ossia del mutamento orientato alla costruzione di dispositivi di sopravvivenza, come occhi, orecchie, articolazione del gomito e dispositivi di ecolocazione. Ovviamente grandi quantità di mutamento evolutivo possono essere non adattive, nel qual caso queste teorie alternative, pur potendo avere una certa importanza in talune parti dell'evoluzione, non hanno alcuna incidenza in quelle parti che riguardano ciò che c'è di speciale nella vita in contrapposizione al mondo inanimato. Questo è particolarmente chiaro nel caso della teoria neutralista dell'evoluzione. Questa teoria ha una lunga storia, ma è particolarmente facile da afferrare nella sua versione moderna, molecolare, nella quale è stata portata avanti soprattutto dal grande genetista giapponese Motoo Kimura, il cui stile di scrittura in inglese, per inciso, potrebbe far arrossire più di un nativo del Regno Unito.

Ci siamo già imbattuti brevemente nella teoria neutralista.

L'idea, come il lettore ricorderà, è che versioni diverse di una stessa molecola, per esempio versioni della molecola di emoglobina che differiscono nella precisa sequenza dei loro amminoacidi, sono altrettanto buone. Ciò significa che le mutazioni che distinguono una versione alternativa di emoglobina da un'altra sono neutre per quanto concerne la selezione naturale. I neutralisti credono che la grande maggioranza dei mutamenti evolutivi, al livello della genetica molecolare, siano neutri: casuali rispetto alla selezione naturale. La scuola di genetisti alternativa, quella dei cosiddetti selezionisti, ritiene che la selezione naturale sia una forza potente persino al livello dei particolari in ogni punto lungo le catene molecolari.

È importante distinguere fra due questioni separate. La prima è la questione importante ai fini di questo capitolo, se il neutralismo possa essere un'alternativa valida alla selezione come spiegazione dell'evoluzione adattiva. La seconda, del tutto distinta, è la questione se la maggior parte del mutamento evolutivo che effettivamente si verifica sia o no adattiva. Dato che stiamo parlando di un mutamento evolutivo da una forma di molecola a un'altra, quanto è probabile che il mutamento si sia determinato attraverso la selezione naturale, e quanto è probabile che si tratti di un mutamento neutro verificatosi attraverso una deriva casuale? Su questo secondo problema uno scontro dagli esiti alterni è infuriato fra i genetisti molecolari, e prima ebbe la meglio una parte e poi l'altra. Ma se noi concentriamo il nostro interesse sull'adattamento - la prima questione -, l'intera controversia si riduce a una tempesta in un bicchier d'acqua perché né noi né la selezione naturale siamo in grado di vederla.

Una mutazione neutra non è affatto una mutazione, quando stiamo pensando a gambe e braccia e ali e occhi e comportamento! Per usare di nuovo l'analogia della ricetta, la torta avrà lo stesso sapore se alcune parole della ricetta saranno «mutate» venendo stampate in un carattere diverso. Per quelli di

noi che sono interessati al risultato finale, ossia alla torta quale esce dal forno, la ricetta non cambia tanto che sia stampata così o così o così. I genetisti molecolari sono come tipografi pedanti. Si preoccupano della forma delle parole con cui le ricette sono scritte. La selezione naturale non si preoccupa minimamente della forma, e neppure dovremmo preoccuparcene noi quando stiamo parlando dell'evoluzione dell'adattamento. Quando ci occuperemo di altri aspetti dell'evoluzione, per esempio dei ritmi di evoluzione in diverse linee filogenetiche, potranno assumere un maggiore interesse per noi le mutazioni neutre.

Persino il neutralista più ardente ammette senza alcuna difficoltà che è alla selezione naturale che si deve ogni adattamento.

Tutto quel che egli dice è che la maggior parte del mutamento evolutivo non è adattamento. Egli potrebbe aver ragione, anche se c'è una scuola di genetisti che non sarebbe d'accordo. Dalla mia posizione periferica io spero che abbiano la meglio i neutralisti, poiché questa loro vittoria renderebbe molto più facile accertare rapporti evolutivi e ritmi di evoluzione. Tutti, da entrambe le parti, ammettono che l'evoluzione neutra non può condurre al miglioramento adattivo, per la semplice ragione che l'evoluzione neutra è, per definizione, casuale, mentre il miglioramento adattivo è, per definizione, non casuale. Ancora una volta, non siamo riusciti a trovare alcuna alternativa alla selezione darwiniana come spiegazione per il carattere che distingue la vita dalla non-vita, ossia per la complessità adattiva.

Veniamo ora a un'altra rivale storica del darwinismo: la teoria del «mutazionismo». Nei primi anni del Novecento, quando si coniò per la prima volta il vocabolo mutazione, la teoria delle mutazioni - anche se oggi stentiamo a comprenderlo - fu considerata non una parte della teoria di Darwin, bensì una teoria alternativa dell'evoluzione! Ci fu una scuola di genetisti noti come «mutazionisti», comprendente nomi famosi come Hugo de Vries e William Bateson, che furono fra i primi riscopritori dei principi dell'eredità di Mendel, Wilhelm Johannsen, l'inventore della parola «gene», e Thomas Hunt Morgan, il padre della teoria cromosomica dell'eredità. De Vries, in particolare, fu impressionato dalla grandezza del mutamento che poteva essere provocato dalle mutazioni, e pensò che le nuove specie avessero sempre origine da singole mutazioni di grande entità. Egli e Johannsen credevano che la maggior parte delle variazioni all'interno della specie fossero non genetiche. Tutti i mutazionisti credevano che il ruolo svolto nell'evoluzione dalla selezione fosse, nel caso migliore, un ruolo di eliminazione. La forza realmente creativa risiedeva nella mutazione stessa. La genetica mendeliana veniva concepita non come il pilastro centrale del darwinismo, come è oggi, bensì come antitetica al darwinismo.

E estremamente difficile per la mente moderna rispondere a quest'idea con qualcosa di diverso dall'ilarità, ma dobbiamo guardarci dall'imitare il tono paternalistico dello stesso Bateson: «Noi ci rivolgiamo a Darwin per la sua incomparabile collezione di fatti [ma...] per noi egli non parla più con un'autorità filosofica. Noi leggiamo il suo schema di evoluzione nello stesso modo in cui leggeremmo quelli di Lucrezio o di Lamarck». E ancora: «La trasformazione di masse di popolazioni per mezzo di passi impercettibili guidati dalla selezione è, come ben si rende conto oggi la maggior parte di noi, così inapplicabile ai fatti che non possiamo fare a meno di meravigliarci sia per la mancanza di penetrazione rivelata dai fautori di una tale tesi sia per l'abilità forense con cui si poté farla apparire accettabile anche solo per un po' di tempo». Fu soprattutto R.A. Fisher a capovolgere la situazione e a mostrare che, lungi dall'essere antitetica al darwinismo, l'eredità parcellizzata mendeliana ne era in realtà essenziale.

La mutazione è una condizione necessaria per l'evoluzione, ma come si sarebbe mai potuto pensare che ne fosse anche una condizione sufficiente? Il mutamento evolutivo è miglioramento, in misura assai più grande di quanto ci si potrebbe attendere se operasse il solo caso. Il problema, quando si veda nella mutazione l'unica forza evolutiva, è molto semplice: in che modo la mutazione potrebbe sapere che cosa sia bene per l'animale e che cosa no? Fra tutti i mutamenti che possono verificarsi in un meccanismo complesso come un organo, la grande maggioranza lo peggioreranno. Solo una piccola minoranza di mutamenti potranno essere considerati miglioramenti. Chiunque voglia sostenere che la mutazione, non corretta dal filtro della selezione naturale, sia la forza motrice dell'evoluzione, deve spiegare come mai le mutazioni tendano a introdurre miglioramenti. In virtù

di quale misteriosa sapienza innata il corpo sceglierebbe di mutare in direzione del miglioramento, anziché del peggioramento? Il lettore osserverà che questa, anche se esposta in forma diversa, è in realtà la stessa domanda che ci siamo posti nel caso del lamarckismo. I mutazionisti, non occorre dirlo, non hanno mai risposto a questa domanda. La cosa strana è che pare che essa non si sia neppure mai posta loro.

Oggi, e ingiustamente, questo fatto ci sembra tanto più assurdo in quanto noi siamo stati educati a credere che le mutazioni siano «casuali». Se le mutazioni sono casuali, allora, per definizione, non possono essere orientate verso il miglioramento. Ma la scuola mutazionistica, ovviamente, non considerò casuali le mutazioni. I mutazionisti pensavano che il corpo avesse una tendenza innata a mutare in certe direzioni piuttosto che in altre, anche se lasciavano aperto il problema di come il corpo «sapesse» quali mutazioni potessero rivelarsi buone in futuro. Mentre rifiutiamo questa posizione come una forma di nonsenso mistico, è importante per noi chiarire esattamente che cosa intendiamo dicendo che la mutazione è casuale. Ce casualità e casualità, e molte persone confondono i diversi significati della parola. Ci sono, ovviamente, molti aspetti sotto cui la mutazione non è casuale. Tutto ciò su cui vorrei insistere è che questi aspetti non comprendono nulla che equivalga a una predizione di ciò che potrebbe migliorare la vita per l'animale. E qualcosa di equivalente alla predizione si richiederebbe in effetti se, per spiegare l'evoluzione, si dovesse far ricorso alla mutazione senza la selezione naturale. E istruttivo investigare un po' oltre sui sensi in cui la mutazione è, e non è, casuale.

Il primo aspetto sotto cui la mutazione non è casuale è il seguente. Le mutazioni non si limitano semplicemente ad accadere ma sono causate da eventi fisici definiti. Esse sono indotte dai cosiddetti «agenti mutageni» (i quali sono pericolosi perché spesso danno inizio a tumori maligni): raggi X, raggi cosmici, sostanze radioattive, varie sostanze chimiche e persino altri geni, detti «geni mutatori». In secondo luogo, non tutti i geni in tutte le specie presentano la stessa probabilità di mutare. Ogni locus sui cromosomi ha il proprio tasso di mutazione caratteristico. Per esempio, il tasso con cui la mutazione crea il gene per la malattia nota come corea di Huntington (simile al «ballo di san Vito»), la quale uccide molti giovani fra i trenta e i quarant'anni, è di circa 1 su 200.000. Il tasso corrispondente per l'acondroplasia (la sindrome familiare del nanismo, tipica dei cani bassotti e dei beagle, in cui gli arti, anteriori e posteriori, sono troppo corti in relazione al corpo) è circa dieci volte maggiore.

Questi tassi vengono misurati in condizioni normali. Se sono presenti agenti mutageni come raggi X, tutti i tassi di mutazione normali aumentano in misura anche notevole. Alcune parti dei cromosomi sono «punti caldi» con un ricambio molto elevato di geni, un tasso locale di mutazioni molto elevato.

In terzo luogo, in ciascun locus dei cromosomi, sia esso o no un punto caldo, le mutazioni in certe direzioni possono essere più probabili delle mutazioni in direzione inversa. Questo fatto dà origine al fenomeno noto come «pressione di mutazione», che può avere conseguenze filogenetiche. Anche se, per esempio, due forme della molecola di emoglobina, la forma 1 e la forma 2, sono neutre ai fini della selezione, nel senso che sono altrettanto efficaci ai fini del trasporto dell'ossigeno nel sangue, potrebbe ancora darsi che le mutazioni dalla 1 alla 2 fossero più comuni delle mutazioni inverse dalla 2 alla 1. In questo caso la pressione di mutazione tenderà a rendere la forma 2 più comune della forma 1. Si dice che la pressione di mutazione in un locus cromosomico dato è zero se il tasso di mutazione in avanti in quel locus è controbilanciato esattamente dal ritmo di mutazione all'indietro.

Ora possiamo renderci conto che il problema se la mutazione sia realmente casuale non è un problema banale. La soluzione dipende dal significato che assegniamo alla parola casuale. Se intendiamo l'espressione «mutazione casuale» nel senso che le mutazioni siano sottratte all'influenza di eventi esterni, allora i raggi X confutano la tesi che la mutazione sia casuale. Se si pensa che l'espressione «mutazione casuale» implichi che tutti i geni abbiano uguali probabilità di mutare, allora i punti caldi dimostrano che la mutazione non è casuale. Se si pensa che l'espressione «mutazione casuale» implichi che in tutti i loci cromosomici la pressione di mutazione sia zero, ancora una volta la mutazione non è casuale. La mutazione è veramente casuale solo se si definisce

«casuale» come «non avente alcuna tendenza generale verso il miglioramento corporeo». Tutte tre i tipi di vera non-casualità che abbiamo considerato sono impotenti a far muovere l'evoluzione in direzione del miglioramento adattivo in contrapposizione a qualsiasi altra direzione (funzionalmente) «casuale». C'è anche un quarto tipo di non-casualità per il quale questa conclusione è valida, benché in modo leggermente meno palese. Sarà necessario spendere un po' di tempo su questo argomento perché esso mette in imbarazzo persino alcuni biologi moderni.

Ci sono delle persone per le quali la parola «casuale» ha un significato a mio parere piuttosto bizzarro. Cito da due oppositori del darwinismo (P. Saunders e M.-W. Ho), i quali attribuiscono ai darwiniani la seguente concezione delle «mutazioni casuali»: «Il concetto neodarwiniano di variazione casuale racchiude in sé il grave errore che tutto ciò che è concepibile sia possibile». «Si ritiene che tutti i mutamenti siano possibili e tutti ugualmente probabili» (il corsivo è mio). Lungi dal nutrire questa convinzione, non riesco a vedere come si riesca a dare a essa anche un minimo di significato! Che senso potrebbe avere ritenere che «tutti» i mutamenti siano ugualmente probabili? Tutti i mutamenti?

Perché due o più cose siano «ugualmente probabili» è necessario che esse siano definibili come eventi discreti. Per esempio, noi possiamo dire «testa e croce sono ugualmente probabili» perché testa e croce sono due eventi discreti. Ma «tutti i mutamenti... possibili» in un corpo di un animale non sono eventi discreti di questo tipo. Consideriamo i due eventi possibili: «La coda di una mucca si allunga di un centimetro» e «La coda di una mucca si allunga di due centimetri». Questi due eventi sono separati, e perciò «ugualmente probabili»? Oppure sono soltanto varianti quantitative di uno stesso evento?

È chiaro che questi autori hanno creato una sorta di caricatura del darwiniano la cui nozione di casualità è un estremo assurdo, se non del tutto destituito di ogni significato. Io ho impiegato un certo tempo a capire questa caricatura, giacché essa è del tutto estranea al modo di pensare dei darwiniani che conosco. Ora però penso di averla compresa e cercherò di spiegarla, essendo convinto che questo tentativo possa essere utile per capire che cosa si celi dietro gran parte dell'opposizione al darwinismo.

L'evoluzione è un prodotto congiunto della variazione e della selezione. Il darwiniano dice che la variazione è casuale nel senso che non è orientata verso il miglioramento, e che la tendenza verso il miglioramento che si osserva nell'evoluzione è fornita dalla selezione naturale. Noi possiamo immaginare una sorta di continuo di dottrine evoluzionistiche, col darwinismo a un estremo e il mutazionismo all'altro. Il mutazionista estremo crede che la selezione non svolga alcun ruolo nell'evoluzione.

La direzione dell'evoluzione sarebbe determinata dalle mutazioni offerte. Consideriamo, per esempio, l'accrescimento del cervello umano che ha avuto luogo negli ultimi milioni di anni della nostra evoluzione. Il darwiniano dice che lo spettro di variazione offerto dalla mutazione alla selezione naturale abbracciò individui dal cervello più piccolo e individui dal cervello più grande, e che fu la selezione a favorire questi ultimi. Il mutazionista dice che una tendenza a favore di cervelli più grandi era già presente nel campo di variazione offerto dalla mutazione, che non ci fu alcuna selezione (o bisogno di selezione) dopo che la variazione fu offerta; e che i cervelli divennero più grandi perché le mutazioni avevano una tendenza intrinseca verso la produzione di cervelli più grandi. Per compendiare l'argomento: nell'evoluzione si verificò una tendenza a favore di cervelli più grandi; questa tendenza poteva essere fornita dalla sola selezione (l'opinione darwiniana) o dalla sola mutazione (la concezione dei mutazionisti); possiamo immaginare un continuo fra questi due punti di vista, quasi una sorta di compromesso fra le due possibili fonti della tendenza evolutiva. Un punto di vista intermedio potrebbe consistere nel pensare che nelle mutazioni ci sia stata una certa tendenza verso l'ingrossamento del cervello e che la selezione abbia accresciuto tale tendenza nella popolazione che riuscì a sopravvivere.

L'elemento di caricatura si presenta nella descrizione di ciò che il darwiniano intende quando dice che nel campo di variazione che le mutazioni offrono alla selezione non c'è alcuna tendenza.

Per me, come darwiniano «in grandezza naturale», ciò significa solo che la mutazione non ha un orientamento sistematico verso il miglioramento adattivo. Ma per la caricatura del darwiniano, in

dimensioni «più grandi del naturale», ciò significa che tutti i mutamenti concepibili sono «ugualmente probabili». A prescindere dall'impossibilità logica di una tale convinzione, sulla quale ci siamo già soffermati, il darwiniano caricaturale crederebbe che il corpo è un'argilla infinitamente malleabile, pronta a essere plasmata dall'onnipotenza della selezione in qualsiasi forma che la selezione stessa potesse prediligere. È importante comprendere la differenza fra il darwiniano al naturale e la caricatura. Cercheremo di chiarire questa differenza con l'aiuto di un esempio particolare, quello della differenza fra le tecniche di volo dei pipistrelli e degli angeli.

Gli angeli sono sempre rappresentati come dotati di ali che spuntano loro dalla schiena, mentre le loro braccia non sono ricoperte da piume. I pipistrelli, invece, così come gli uccelli e gli pterodattili, non hanno braccia indipendenti. Le loro braccia ancestrali sono state incorporate nelle ali, e non possono essere usate, o possono esserlo solo in modo molto goffo, per scopi diversi, come per esempio quello di procurarsi cibo. Ora ascolteremo una conversazione fra un darwiniano al naturale e una caricatura estrema di un darwiniano. al naturale Mi chiedo perché i pipistrelli non abbiano sviluppato ali come gli angeli. È plausibile pensare che essi avrebbero un vantaggio dal poter usare un paio di braccia libere. I topi usano di continuo gli arti anteriori per raccogliere cibo e rosicchiarlo, e i pipistrelli, essendo senza braccia, sembrano terribilmente goffi al suolo. Una risposta potrebbe essere, secondo me, che le mutazioni non fornirono mai la variazione necessaria. Non ci furono mai pipistrelli ancestrali mutanti dotati di abbozzi alari nella parte mediana del dorso. caricatura è assurdo. La selezione è tutto. Se i pipistrelli non hanno ali come gli angeli, ciò può significare solo che la selezione non favorì ali come quelle degli angeli. Ci furono certamente pipistrelli mutanti con abbozzi alari nella parte mediana del dorso, ma la selezione semplicemente non favorì questo tipo di ali. al naturale Be', sono del tutto d'accordo che la selezione non avrebbe potuto favorirle, se fossero spuntate. Tanto per cominciare esse avrebbero aumentato il peso dell'intero animale, e del peso in eccesso è un lusso che nessuna macchina volante può permettersi. Senza dubbio, però, Lei non penserà che, qualsiasi cosa la selezione possa favorire in linea di principio, la mutazione troverà sempre la variazione necessaria. caricatura Certo che lo penso. La selezione è tutto. La mutazione è casuale. al naturale Va bene, la mutazione è casuale, ma ciò significa solo che essa non può vedere nel futuro e progettare che cosa sarebbe bene per l'animale. Non significa che sia possibile assolutamente qualsiasi cosa. Perché, secondo Lei, nessun animale spira fuoco dalle narici come un drago, per esempio?

Non sarebbe utile per catturare e cucinare la preda? caricatura è chiaro. La selezione è tutto. Gli animali non spirano fuoco perché non ne sarebbero ripagati. I mutanti che spirassero fuoco sarebbero eliminati dalla selezione naturale, per esempio perché la produzione di fuoco potrebbe comportare un dispendio di energia eccessivo. al naturale Io non credo che ci siano mai stati dei mutanti capaci di spirare fuoco. E se ci fossero stati, presumibilmente avrebbero corso un grave pericolo di ustionarsi! caricatura è assurdo. Se questo fosse stato l'unico problema, la selezione avrebbe favorito l'evoluzione di narici rivestite di amianto. al naturale Io non credo che alcuna mutazione abbia mai prodotto narici rivestite di amianto. Non credo che animali mutanti potrebbero secernere amianto, come non credo che mucche mutanti potrebbero arrivare con un salto sulla Luna. caricatura Qualsiasi mucca mutante capace di arrivare con un salto sulla Luna sarebbe eliminata subito dalla selezione naturale. Lassù, come Lei sa, non c'è ossigeno. al naturale Sono stupito che Lei non postuli mucche mutanti con tute spaziali e maschere per l'ossigeno previste dal corredo genetico. caricatura Bella osservazione! In realtà io penso che la vera spiegazione sia che non sarebbe utile per le mucche saltare sulla Luna. E non dobbiamo dimenticare quale costo energetico comporti il raggiungere la velocità di fuga. al naturale Questo è assurdo. caricatura è chiaro che Lei non è un vero darwiniano. Che cos'è Lei, forse una sorta di deviazionista cripto-mutazionista? al naturale Se la pensa così, dovrebbe conoscere un vero mutazionista. mutazionista Questa è una discussione darwiniana privata, o posso dire anch'io la mia? Il guaio, per voi due, è che accordate un peso eccessivo alla selezione. Tutto ciò che la selezione può fare è di eliminare deformità grossolane e scherzi di natura. Essa non può produrre un'evoluzione realmente costruttiva.

Torniamo all'evoluzione delle ali dei pipistrelli.

Quel che accadde realmente fu che, in un'antica popolazione di animali che vivevano al suolo,

cominciarono a verificarsi mutazioni con dita allungate e membrane di pelle fra un dito e l'altro. Al passare delle generazioni, queste mutazioni divennero sempre più frequenti finché l'intera popolazione finì con l'avere le ali. Questo fatto non ebbe nulla a che fare con la selezione. Ci fu solo questa tendenza innata nel pipistrello ancestrale a evolvere ali. al naturale e caricatura (all'unisono) Misticismo bello e buono!

Se ne torni al secolo scorso, a cui propriamente appartiene!

Io spero di non essere presuntuoso supponendo che le simpatie del lettore non vadano né al mutazionista né alla caricatura di un darwiniano. Io suppongo che il lettore concordi, come me, col darwiniano al naturale. La caricatura non esiste nella realtà. Purtroppo alcuni pensano che esista e, essendo in disaccordo con tale ipotetico darwiniano, pensano di essere in disaccordo anche nei confronti del darwinismo. C'è una scuola di biologi che hanno cominciato a dire cose come quelle che espongo qui di seguito. Il guaio, nel caso del darwinismo, è che trascura le costrizioni imposte dall'embriologia. I darwiniani (ecco dove entra in scena la caricatura) pensano che, se la selezione favorisse qualche mutamento evolutivo concepibile, la varietà di mutazioni necessarie risulterebbe senza dubbio disponibile. Le mutazioni sono altrettanto probabili in qualsiasi direzione: è la selezione a fornire l'unica tendenza.

Ogni darwiniano al naturale riconoscerebbe però che, benché un qualsiasi gene in qualsiasi cromosoma possa mutare in qualsiasi tempo, le conseguenze delle mutazioni sui corpi sono severamente limitate dai processi embriologici. Se io ne avessi mai dubitato (cosa che in realtà non è mai accaduta), i miei dubbi sarebbero stati dissolti dalle simulazioni al computer con i miei biomorfi. Non è possibile postulare solo una mutazione «per» la formazione di ali dalla regione mediana del dorso. Le ali, o qualsiasi altra cosa, possono evolversi solo se il processo di sviluppo consente loro di evolversi. Nulla «spunta» come per magia. Tutto viene costruito dai processi di sviluppo embrionale. Soltanto una minoranza delle cose che potrebbero concepibilmente evolversi sono in realtà permesse dallo status quo di processi di sviluppo esistenti. A causa del modo in cui si sviluppano le braccia, le mutazioni possono far aumentare la lunghezza delle dita e far crescere una membrana di pelle fra di esse. Nell'embriologia del dorso non c'è invece nulla che si presti a far «spuntare» ali come quelle degli angeli. I geni possono mutare fino allo sfinimento, ma nessun mammifero metterà mai ali come un angelo, a meno che i processi embriologici mammaliani non siano suscettibili di questo tipo di mutamento.

Ora, finché non conosciamo tutti i particolari del modo di sviluppo degli embrioni, c'è spazio per dissensi sulla probabilità che certe mutazioni immaginate particolari siano o non siano esistite. Potrebbe risultare, per esempio, che nell'embriologia mammaliana non c'era nulla che vietasse la formazione di ali come quelle degli angeli, e che il darwiniano caricaturale aveva ragione, in questo caso particolare, a suggerire che abbozzi di ali come quelle degli angeli si formarono ma non furono favoriti dalla selezione. Oppure, quando ne sapremo di più sull'embriologia, potremmo renderci conto che le ali degli angeli non ebbero mai alcuna possibilità di successo, e che perciò la selezione non ebbe mai alcuna chance di favorirle. C'è una terza possibilità, che dovremmo elencare per completezza, ossia che all'embriologia non sia mai stata concessa la possibilità di sviluppare ali come quelle degli angeli e che la selezione non le avrebbe mai favorite neppure se l'embriologia avesse avuto tale possibilità. Ma ciò su cui dobbiamo particolarmente insistere è che non possiamo permetterci di ignorare le costrizioni che l'embriologia impone all'evoluzione. Ogni darwiniano serio sarebbe d'accordo su questo; eppure alcuni presentano i darwiniani come se negassero questo fatto. Risulta che coloro che fanno molto rumore sulle «costrizioni sullo sviluppo» come presunta forza antidarwiniana stanno confondendo il darwinismo con la caricatura del darwinismo da me parodiata sopra.

Tutte queste argomentazioni hanno avuto inizio con una discussione di ciò che si intende quando diciamo che le mutazioni sono «casuali». Io ho elencato tre aspetti sotto i quali le mutazioni non sono casuali: esse sono indotte da raggi X ecc.; i tassi di mutazione sono diversi per i diversi geni; e i tassi di mutazioni progressive non devono affatto uguagliare i tassi di mutazioni regressive. A questi aspetti sotto i quali le mutazioni non sono casuali ne abbiamo aggiunto ora un quarto. Le mutazioni non sono casuali nel senso che possono apportare alterazioni solo a processi di sviluppo

embrionale già esistenti. Esse non possono introdurre dal nulla un qualsiasi mutamento concepibile che potrebbe essere favorito dalla selezione. La variazione disponibile per la selezione è vincolata dai processi dell'embriologia quali esistono in realtà.

C'è un quinto aspetto sotto il quale le mutazioni potrebbero non essere casuali. Noi possiamo immaginare una (sola) forma di mutazione con una tendenza sistematica verso il miglioramento dell'adattamento dell'animale alla sua vita. Ma, benché possiamo immaginarla, nessuno ha mai potuto suggerire, neppure nel modo più vago, alcun mezzo con cui questa tendenza potrebbe prodursi. Solo in relazione a questo quinto punto di vista, che è quello del «mutazionista», il darwiniano vero, al naturale, insiste nel sostenere il carattere casuale della mutazione.

La mutazione non ha alcuna tendenza sistematica in direzione del miglioramento adattivo, e non si conosce alcun mutamento (per esprimerci moderatamente) in grado di guidare le mutazioni in direzioni che non siano casuali in questo quinto senso.

La mutazione è casuale in relazione al vantaggio adattivo, anche se è non casuale sotto tutti gli altri aspetti. È la selezione, e solo la selezione, a dirigere l'evoluzione in direzioni che sono non casuali in relazione al vantaggio. Il mutazionismo non è solo sbagliato di fatto. Esso non avrebbe mai potuto essere giusto.

Esso non è capace in linea di principio di spiegare l'evoluzione del miglioramento. La scuola mutazionista ha in comune col lamarckismo il fatto non di essere una rivale confutata dal darwinismo, ma di non essere semplicemente una sua rivale.

Lo stesso vale per la prossima presunta rivale della selezione darwiniana, propugnata dal genetista di Cambridge Gabriel Dover sotto lo strano nome di «spinta molecolare» (dal momento che ogni cosa è fatta di molecole, non è chiaro perché l'ipotetico processo di Dover dovrebbe meritare il nome di spinta molecolare più di un qualsiasi altro processo evolutivo; esso mi ricorda un mio conoscente che si lagnava di uno stomaco gastrico e che rifletteva sulle cose usando il suo cervello mentale). Motoo Kimura e gli altri proponenti della teoria neutralista dell'evoluzione non avanzano, come abbiamo visto, alcuna falsa rivendicazione a favore della loro teoria. Essi non si illudono che la deriva casuale possa essere una rivale della selezione naturale come spiegazione dell'evoluzione adattiva. Essi riconoscono che solo la selezione naturale può guidare l'evoluzione in direzioni adattive.

La loro tesi è semplicemente che una quantità di mutamenti evolutivi (nel modo in cui vede il mutamento evolutivo un genetista) non è adattiva. Dover non fa affermazioni così modeste per la sua teoria. Egli pensa di poter spiegare l'intera evoluzione senza la selezione naturale, anche se concede generosamente che potrebbe esserci un po' di verità anche nella selezione naturale!

In tutto questo libro, l'esempio cui abbiamo fatto ricorso di preferenza nel considerare questi argomenti è stato quello dell'occhio, anche se, ovviamente, esso è solo rappresentativo di una grande serie di organi che sono troppo complessi e troppo ben progettati per poter essere stati creati dal solo caso. Soltanto la selezione naturale, ho sostenuto ripetutamente, si avvicina a offrire una spiegazione plausibile per l'occhio umano e per organi comparabili di estrema perfezione e complessità. Per fortuna Dover ha raccolto esplicitamente la sfida e ha offerto una sua propria spiegazione per l'evoluzione dell'occhio. Supponiamo, dice, che per sviluppare l'occhio dal nulla siano necessari 1000 passi di evoluzione. Ciò significa che sono stati necessari 1000 mutamenti genetici per trasformare una chiazza di pelle nuda in un occhio. Questo mi sembra un assunto ragionevole ai fini della discussione. Nei termini del Paese dei Biomorfi, ciò significa che l'animale con semplici chiazze di pelle nuda è lontano 1000 passi genetici dall'animale dotato di occhi. Ora, come spieghiamo che, per pervenire all'occhio come lo conosciamo, fu intrapresa proprio la giusta serie di 1000 passi?

La spiegazione della selezione naturale è ben nota. Riducendola alla sua forma più semplice, in corrispondenza di ciascuno dei 1000 passi la mutazione offriva un certo numero di alternative, una sola delle quali fu favorita perché contribuiva alla sopravvivenza. I 1000 passi dell'evoluzione rappresentano 1000 punti di scelta successivi, in corrispondenza di ciascuno dei quali la maggior parte delle alternative conducevano alla morte. La complessità adattiva dell'occhio moderno è il prodotto finale di 1000

«scelte» inconsce che condussero al successo. La specie ha seguito un particolare percorso attraverso il labirinto di tutte le possibilità. Lungo questo percorso c'erano 1000 punti di ramificazione, e in corrispondenza di ciascuno di essi sopravvissero coloro che riuscirono a prendere la svolta che conduceva a migliorare la vista. I margini della strada sono cosparsi delle spoglie degli organismi che imboccarono una via sbagliata in ciascuno dei 1000 punti di scelta successivi. L'occhio che conosciamo è il prodotto finale di una sequenza di 1000 «scelte» selettive coronate da successo.

Questa è (una delle maniere di esprimere) la spiegazione dell'evoluzione dell'occhio in 1000 passi per mezzo della selezione naturale. Che dire, ora, della spiegazione di Dover? Fondamentalmente, Dover sostiene che la scelta fatta a ogni passo dalla linea genealogica non avrebbe avuto alcuna importanza: retrospettivamente, si sarebbe trovato un uso per l'organo risultante.

Ogni passo intrapreso dalla linea genealogica fu, secondo lui, un passo casuale. Al passo numero 1, per esempio, una mutazione casuale si diffuse nella specie. Poiché il nuovo carattere era funzionalmente casuale, non era d'aiuto alla sopravvivenza dell'organismo. La specie esplorò allora il mondo alla ricerca di un nuovo posto o di un nuovo modo di vita in cui poter usare questo nuovo carattere casuale che era stato imposto ai suoi appartenenti. Avendo trovato una parte dell'ambiente adatta alla parte del proprio corpo conseguita in modo casuale, i membri della specie vi vissero per un po' di tempo, finché non si presentò e si diffuse nella specie una nuova mutazione casuale. Ora la specie dovette esplorare il mondo alla ricerca di un nuovo posto o di un nuovo modo di vita in accordo con la nuova parte casuale di recente conseguita. Una volta terminata questa ricerca, il passo numero 2 era completato. A questo punto si diffondeva nella specie la mutazione casuale corrispondente al passo numero 3 e così via per l'intera serie dei 1000 passi, al termine della quale si formò l'occhio quale lo conosciamo oggi. Dover sottolinea che l'occhio umano si trova a usare di fatto quella che chiamiamo luce «visibile» anziché, per esempio, l'infrarosso.

Ma se dei processi casuali ci avessero imposto invece un occhio sensibile all'infrarosso, ne avremmo senza dubbio egualmente ricavato il massimo, e avremmo trovato un modo di vita in grado di sfruttare a fondo la radiazione infrarossa.

A tutta prima quest'idea ha una certa aria di plausibilità seducente, ma solo per un istante brevissimo. Il suo carattere seducente le deriva dal modo esattamente simmetrico in cui la selezione naturale è capovolta. La selezione naturale, nella sua forma più semplice, suppone che l'ambiente sia imposto alla specie, e che sopravvivano le varianti genetiche meglio adattate all'ambiente. L'ambiente è imposto, e la specie si evolve per adattarsi a esso. La teoria di Dover capovolge questa impostazione. In essa è «imposta» la natura della specie, in questo caso dalle vicissitudini delle mutazioni e da altre forze genetiche interne per le quali Dover ha uno speciale interesse. La specie localizza allora il membro della serie di tutti gli ambienti che meglio si adatta alla sua natura imposta.

Ma la forza di seduzione della simmetria è in realtà superficiale. Il carattere estremamente semplicistico dell'idea di Dover si manifesta nel modo più chiaro nel momento in cui cominciamo a ragionare in termini numerici. L'essenza del suo schema è che, in ciascuno dei 1000 passi, non ha importanza in quale direzione la specie si awii. Ogni nuova innovazione in cui la specie si imbatteva era funzionalmente casuale, e la specie trovava poi l'ambiente a essa adatto. La conclusione implicita è che la specie avrebbe trovato un ambiente adatto qualunque direzione avesse preso nel punto di ramificazione. Ora, si pensi solo quanti possibili ambienti questa impostazione ci avrebbe fatto postulare. C'erano 1000 punti di ramificazione. Se ogni punto di ramificazione era una semplice biforcazione (anziché una ramificazione in 3 vie, o in 18: un assunto prudente), il numero totale di ambienti in cui poter vivere che dovevano esistere, in linea di principio, per consentire allo schema di Dover di funzionare, è 2 elevato a 1000 (la prima ramificazione dà due vie; ciascuna di queste ne dà poi altre due, ossia quattro in tutto; poi ciascuna di queste vie si ramifica a sua volta, e si perviene così a 8; poi 16, 32, 64... e così sempre avanti sino a 2 alla 1000). Questo numero può essere scritto come 1 seguito da 301 zeri. Esso è molto più grande del numero totale di atomi nell'intero universo.

La presunta rivale escogitata da Dover alla selezione naturale non potrebbe mai funzionare, non

solo in un milione di anni, ma neppure in un tempo un milione di volte più lungo di quello da cui esiste l'universo, e neppure in un milione di universi ciascuno dei quali durasse un milione di volte di più. Si osservi che questa conclusione non viene sensibilmente alterata se modifichiamo l'assunto iniziale di Dover circa il numero di passi che sarebbero necessari per produrre un occhio. Se riduciamo tale numero a soli 100 passi, che è probabilmente una stima troppo piccola, concludiamo ancora che la serie di possibili ambienti che devono essere in attesa, per così dire, dietro le quinte, per poter far fronte a tutti i passi casuali che la linea genealogica potrebbe compiere, è comunque sempre più di un milione di milioni di milioni di milioni di milioni. Questo è un numero più piccolo del precedente, ma significa ancora che la grande maggioranza degli «ambienti» di Dover in attesa dietro le quinte dovrebbero essere composti ciascuno da meno di un singolo atomo.

Val la pena di spiegare perché la teoria della selezione naturale non sia suscettibile di una distruzione analoga da parte dell'«argomento dei grandi numeri». Nel capitolo III abbiamo immaginato tutti gli animali reali e concepibili come situati in un gigantesco iperspazio. Qui stiamo facendo una cosa simile, ma la semplifichiamo considerando i punti di ramificazione come semplici biforcazioni anziché come ramificazioni per esempio in 18 vie. Così l'insieme di tutti gli animali possibili che potrebbero essersi evoluti in 1000 passi evolutivi sono appollaiati su un albero gigantesco, che si ramifica ripetutamente così che il numero totale di ramoscelli finali è un 1 seguito da 301 zeri.

Ogni storia evolutiva reale può essere rappresentata come un particolare percorso lungo questo ipotetico albero. Fra tutte le vie evolutive concepibili, solo una minoranza si è effettivamente realizzata. Noi possiamo pensare la maggior parte di questo «albero di tutti gli animali possibili» come nascosto nelle tenebre della non esistenza. Qua e là alcune traiettorie nell'albero buio sono illuminate. Queste sono le vie evolutive che si sono di fatto realizzate e, per quanto questi rami illuminati siano numerosi, essi sono ancora una minoranza infinitesima rispetto all'insieme di tutti i rami. La selezione naturale è un processo che è capace di scegliersi una propria via attraverso l'albero di tutti gli animali concepibili, e di trovare solo quella minoranza di vie che sono vitali. La teoria della selezione naturale non può essere attaccata col tipo di ragionamento dei grandi numeri con cui io ho attaccato la teoria di Dover perché è implicito nella sua essenza che essa sia continuamente impegnata a tagliare la maggior parte dei rami dell'albero. Proprio questo è ciò che fa la selezione naturale. Essa sceglie la sua via, un passo dopo l'altro, attraverso l'albero di tutti gli animali concepibili, evitando la maggioranza quasi infinitamente grande di rami sterili - animali con occhi sulla pianta dei piedi ecc. - che la teoria di Dover è obbligata, per la natura stessa della sua logica curiosamente invertita, a tollerare.

Ci siamo occupati finora di tutte le presunte alternative alla teoria della selezione naturale tranne che di quella più antica.

Questa è la teoria che la vita sia stata creata, o che la sua evoluzione sia stata diretta, da un artefice cosciente. Sarebbe ovviamente facilissimo demolire una qualche versione particolare di questa teoria, come quella esposta (in una o forse due versioni distinte) nel Genesi. Quasi tutti i popoli hanno sviluppato versioni proprie del mito della creazione, e il racconto del Genesi è solo quello che fu adottato da una particolare tribù di pastori del Vicino Oriente. Esso non può ambire a uno status più speciale di quello della credenza di una particolare tribù dell'Asia occidentale secondo la quale il mondo è stato creato dall'escremento di formiche. Tutti questi miti hanno in comune il fatto di far dipendere la creazione dalle intenzioni deliberate di un qualche tipo di essere soprannaturale. A prima vista c'è un'importante distinzione da fare fra quella che potremmo chiamare «creazione istantanea» e devoluzione guidata». Teologi moderni di un certo livello hanno rinunciato a credere nella creazione istantanea. Le prove a conferma di una qualche sorta di evoluzione sono diventate troppo schiaccianti.

Molti fra i teologi che si definiscono evoluzionisti, come per esempio il vescovo di Birmingham citato nel capitolo II, fanno però rientrare Dio per la porta di servizio: essi gli permettono una qualche sorta di controllo sul corso intrapreso dall'evoluzione, consentendogli di esercitare un'influenza nei momenti chiave della storia filogenetica (specialmente, com'è ovvio, nella storia dell'evoluzione umana) o addirittura di ingerirsi in modo più generale negli eventi quotidiani che,

sommati, determinano il mutamento evolutivo.

Noi non possiamo certamente confutare convinzioni come queste, specialmente se si suppone che Dio abbia preso cura di far sì che i suoi interventi imitassero sempre nel modo più fedele ciò che ci si dovrebbe attendere dall'evoluzione per selezione naturale. Tutto ciò che possiamo dire su queste convinzioni è, in primo luogo, che esse sono superflue e, in secondo luogo, che presuppongono l'esistenza della cosa principale che vogliamo spiegare, ossia della complessità organizzata. L'unica cosa che fa dell'evoluzione una teoria così meravigliosa è che essa ci spiega in che modo la complessità organizzata possa derivare dalla semplicità primordiale.

Se vogliamo postulare una divinità capace di produrre tutta la complessità organizzata nel mondo, o creandola istantaneamente o guidando l'evoluzione, tale divinità dev'essere già di per sé estremamente complessa. Il creazionista, si tratti di un sostenitore ingenuo della verità biblica o di un vescovo colto, postula semplicemente un essere già esistente di prodigiosa intelligenza e complessità. Se noi ci concediamo il lusso di postulare una complessità organizzata senza offrire una spiegazione, potremmo altrettanto bene limitarci a postulare l'esistenza della vita quale la conosciamo! In breve: la creazione divina, sia essa istantanea o nella forma dell'evoluzione guidata, va a unirsi all'elenco delle altre teorie che abbiamo considerato in questo capitolo. Esse danno tutte una qualche impressione superficiale di essere delle alternative al darwinismo i cui meriti potrebbero essere verificati facendo ricorso alle prove empiriche disponibili. A un esame più attento, però, nessuna di esse risulta essere una rivale valida del darwinismo. La teoria dell'evoluzione per selezione naturale cumulativa è l'unica teoria a noi nota che sia capace in linea di principio di spiegare l'esistenza della complessità organizzata. Quand'anche le prove empiriche non la favorissero, essa sarebbe ancora la teoria migliore disponibile! In realtà però, le prove empiriche la favoriscono. Ma questa è un'altra storia.

Ascoltiamo ora la conclusione dell'intero ragionamento. L'essenza della vita è un'improbabilità statistica su una scala colossale. Quale che sia la spiegazione della vita, quindi, essa non può essere il caso. La vera spiegazione dell'esistenza della vita deve includere l'antitesi stessa del caso.

L'antitesi del caso è una sopravvivenza non casuale, intesa in modo appropriato. La sopravvivenza non casuale, intesa in modo improprio, non è l'antitesi del caso, bensì è il caso stesso. C'è un continuo che connette questi due estremi, ed è il continuo che va dalla selezione per passi singoli alla selezione cumulativa. La selezione per passi singoli è solo un altro modo per esprimere il puro caso. Questo è ciò che voglio dire quando parlo di sopravvivenza non casuale intesa in modo improprio. La selezione cumulativa, per passaggi lenti e gradualisti, è la spiegazione, l'unica spiegazione funzionante che sia mai stata proposta, dell'esistenza del disegno complesso della vita. L'intero libro è stato dominato dall'idea del caso, dall'improbabilità astronomica contro la nascita spontanea dell'ordine, della complessità e del disegno intenzionale apparente. Abbiamo cercato un modo per ammansire il caso, per strappargli gli artigli. Il «caso non addomesticato», il caso puro, nudo, significa un disegno ordinato che viene all'esistenza dal nulla, in un singolo balzo. Sarebbe un caso non addomesticato se un tempo non ci fosse stato alcun occhio e poi, d'improvviso, nel breve batter di ciglio d'una generazione, fosse apparso un occhio, pienamente formato, perfetto e completo. Questa è sì una cosa possibile ma le probabilità contrarie ci manterrebbero impegnati a scrivere zeri sino alla fine del tempo. Lo stesso vale per le probabilità contro l'origine spontanea di un qualsiasi essere pienamente formato, perfetto e completo, comprese le divinità (non vedo alcun modo per evitare questa conclusione).

«Addomesticare» il caso significa scomporre il molto improbabile in piccole componenti meno improbabili disposte in serie. Per quanto sia improbabile che un organismo X possa essere derivato da un organismo Y in un singolo salto, è sempre possibile concepire una serie di forme intermedie graduate in modo infinitesimo fra loro. Per quanto improbabile possa essere un mutamento su grande scala, mutamenti più piccoli sono meno improbabili. E purché noi possiamo postulare una serie abbastanza grande di forme intermedie graduate finemente, saremo in grado di derivare qualsiasi cosa da qualsiasi altra cosa senza trovarci necessariamente di fronte a improbabilità astronomiche. Possiamo usare questo metodo solo se c'è stato un tempo sufficiente per l'inclusione di tutte le forme intermedie.

E anche solo se c'è un meccanismo per guidare ciascun passo in una qualche direzione particolare, giacché in caso contrario la sequenza di passi si trasformerà in un vagabondaggio casuale senza fine.

La visione del mondo darwiniana sostiene che entrambe queste condizioni sono soddisfatte, e che una selezione naturale lenta, graduale, cumulativa sia la spiegazione ultima della nostra esistenza. Se ci sono versioni della teoria dell'evoluzione che negano un gradualismo lento e che rifiutano il ruolo centrale della selezione naturale, in certi casi particolari esse possono essere vere. Esse non possono essere però tutta la verità, negando l'essenza stessa della teoria dell'evoluzione, ciò che le dà il potere di dissolvere le improbabilità astronomiche e di spiegare il prodigio di apparenti miracoli.

Bibliografia

- 1 Alberts, B. - Bray, D. - Lewis, J. - Rail, M. - Roberts, K. - Watson, J.D., *Molecular Biology of the Cell*, Garland, New York 1983 (trad. it. *Biologia molecolare della cellula*, Zanichelli, Bologna 1995).
- 2 Anderson, D.M., *Role of Interfacial Water and Water in Thin Films in the Origin of Life*, in *Life in the Universe*, a cura di J. Billingham, MIT Press, Cambridge, Mass., 1981.
- 3 Anderson, D.M., *Female Choice Selects for Extreme Tail Length in a Widow Bird*, «Nature», 299, 1982, pp. 818-20.
- 4 Arnold, S.J., *Sexual Selection: The Interface of Theory and Empiricism*, in *Mate Choice*, a cura di R.P.G. Bateson, Cambridge University Press, Cambridge 1983, pp. 67-107.
- 5 Asimov, I., *Only a Trillion*, Abelard-Schuman, London 1957 (trad. it. *Solo un trilione*, Bompiani, Milano 1966).
- 6 Asimov, I., *Extraterrestrial Civilizations*, Pan Books, London 1980 (trad. it. *Civiltà extraterrestri*, Mondadori, Milano 1979).
- 7 Asimov, I., *In the Beginning*, New English Library, London 1981 (trad. it. *In principio*, Mondadori - De Agostini, Novara 1995).
- 8 Atkins, P.W., *The Creation*, W.H. Freeman, Oxford 1981 (trad. it. *La creazione*, Zanichelli, Bologna 1985).
- 9 Attenborough, D., *Life on Earth*, Reader's Digest, Collins & BBC, London 1980 (trad. it. *La vita sulla Terra*, Selezione dal Reader's Digest, Milano 1984).
- 10 Barker, E., *Let There Be Light: Scientific Creationism in the Twentieth Century*, in *Darwinism and Divinity*, a cura di J.R. Duranl, Basil Blackwell, Oxford 1985, pp. 189-204.
- 11 Bowler, P.J., *Evolution: The History of an Idea*, University of California Press, Berkeley 1984.
- 12 Bowles, K.L., *Problem-Solving Using pascal*, Springer-Verlag, Berlin 1977 (trad. it. *Soluzione di problemi con pascal*, Jackson, Milano 1982).
- 426 Bibliografia 13 Cairns-Smith, A.G., *Genetic Takeover*, Cambridge University Press, Cambridge 1982.
- 14 Cairns-Smith, A.G., *Seven Clues to the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge 1985 (trad. it. *Sette indizi sull'origine della vita*, Liguori, Napoli 1986).
- 15 Cavalli-Sforza, L. - Feldman, M., *Cultural Transmission and Evolution*, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1981.
- 16 Cott, H.B., *Adaptive Coloration in Animals*, Methuen, London 1940.
- 17 Crick F., *Life Itself*, Macdonald, London 1981.
- 18 Darwin, C., *The Origin of Species*, Penguin, London 1859, rist. (trad. it. *L'origine delle specie*, Boringhieri, Torino 1967).
- 19 Dawkins, M.S., *Unravelling Animal Behavior*, Longman, London 1986.
- 20 Dawkins, R., *The Selfish Gene*, Oxford University Press, Oxford 1976 (trad. it. *Il gene egoista*, Mondadori, Milano 1995).
- 21 Dawkins, R., *The Extended Phenotype*, Oxford University Press, Oxford 1982 (trad. it. *Il*

fenotipo esteso, Zanichelli, Bologna 1986).

- 22 Dawkins, R., *Universal Darwinism*, in *Evolution from Molecules to Men*, a cura di D.S. Bendali, Cambridge University Press, Cambridge 1982, pp. 403-25.
 - 23 Dawkins, R. - Krebs, J.R., *Arms Races Between and Within Species*, in *Proceedings of the Royal Society of London*, B: 205, 1979, pp. 489-511.
 - 24 Douglas, A.M., *Tigers in Western Australia*, in «New Scientist», 110: 1505, 1986, pp. 44-47.
 - 25 Dover, G.A., *Improbable Adaptations and Maynard. Smith's Dilemma*, 1984.
Manoscritto inedito e due conferenze pubbliche, Oxford 1984.
 - 26 Dyson, F., *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge 1985.
 - 27 Eigen, M. - Gardiner, W. - Schuster, P. - Winkler-Oswatitsch, R., *The Origin of Genetic Information*, in «Scientific American», 244:4, 1981, pp. 88-118 (trad. it. *L'origine dell'informazione genetica*, in «Le Scienze», 154, giugno 1981, pp. 18 sgg.).
 - 28 Eisner, T., *Spray Aiming in Bombardier Beetles: Jet Deflection by the Coander Effect*, in «Science», 215, 1982, pp. 83-85.
 - 29 Eldredge, N., *Time Frames: The Rethinking of Darwinian Evolution and the Theory of Punctuated Equilibria*, Simon & Schuster, New York 1985; comprende la ristampa dell'articolo originario di Eldredge e Gould (trad. it. *Strutture del tempo*, Hopefulmonster, Firenze 1991).
 - 30 Eldredge, N., *Unfinished Synthesis: Biological Hierarchies and Modern Evolutionary Thought*, Oxford University Press, New York 1985.
- Bibliografia 427
- 31 Fisher, R.A., *The Genetical Theory of Natural Selection*, Clarendon Press, Oxford 1930.
 - 32 Gillespie, N.C., *Charles Darwin and the Problem of Creation*, University of Chicago Press, Chicago 1979.
 - 33 Goldschmidt, R.B., *Mimetic Polymorphism, a Controversial Chapter of Darwinism*, in «Quarterly Review of Biology», 20, 1945, pp. 147-64 e pp. 205-30.
 - 34 Gould, S.J., *The Panda's Thumb*, W.W. Norton, New York 1980
(trad. it. *Il pollice del panda*, Il Saggiatore, Milano 2001).
 - 35 Gould, S.J., *Is a New and General Theory of Evolution Emerging?*, in «Paleobiology», 6, 1980, pp. 119-30.
 - 36 Gould, S.J., *The Meaning of Punctuated Equilibrium, and Its Role in Validating a Hierarchical Approach to Macroevolution*, in *Perspectives on Evolution*, a cura di R. Milkman, Sinauer, Sunderland, Mass., pp. 83-104.
 - 37 Gribbin, J. - Cherfas, J., *The Monkey Puzzle*, Bodley Head, London 1982 (trad. it. *Sorella scimmia*, Mondadori, Milano 1984).
 - 38 Griffin, D.R., *Listening in the Dark*, Yale University Press, New Haven 1958 (trad. it. *Guidandosi con l'eco*, Zanichelli, Bologna 1966).
 - 39 Hallam, A., *A Revolution in the Earth Sciences*, Oxford University Press, Oxford 1973 (trad. it. *Una rivoluzione nelle scienze della Terra*, Zanichelli, Bologna 1981).
 - 40 Hamilton, W.D. - Zuk, M., *Heritable True Fitness and Bright Birds: A Role for Parasites?*, in «Science», 218, 1982, pp. 384-87.
 - 41 Hitching, F., *The Neck of the Giraffe, or Where Darwin Went Wrong*, Pan Books, London 1982.
 - 42 Ho, M.-W. - Saunders, P., *Beyond Neo-Darwinism*, Academic Press, London 1984.
 - 43 Hoyle, F. - Wickramasinghe, N.C., *Evolution from Space*, J.M. Dent, London 1981 (trad. it. *Evoluzione dallo spazio*, Etas Libri, Milano 1984).
 - 44 Hull, D.L., *Darwin and His Critics*, Chicago University Press, Chicago 1973.
 - 45 Jacob, F., *The Possible and the Actual*, Pantheon, New York 1982.
 - 46 Jerison, H.J., *Issues in Brain Evolution*, in *Oxford Surveys in Evolutionary Biology*, 2, 1985, a cura di R. Dawkins e M. Ridley, pp. 102-34.
 - 47 Kimura, M., *The Neutral Theory of Molecular Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge 1982.
 - 48 Kitcher, P., *Abusing Science: the Case Against Creationism*, Open University Press, Milton

Keynes 1983.

428 Bibliografia 49 Land, M.F., Optics and Vision in Invertebrates, in Handbook of Sensory Physiology, a cura di H. Autrum, Springer, Berlin 1980, pp. 471-592.

50 Lande, R., Sexual Dimorphism, Sexual Selection, and Adaptation in Polygenic Characters, in «Evolution», 34, 1980, pp. 292-305.

51 Lande, R., Models of Speciation by Sexual Selection of Polygenic Traits, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», 78, 1981, pp. 3721-25.

52 Leigh, E.G., How Does Selection Reconcile Individual Advantage with the Good of the Group?, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», 74, 1977, pp. 4542-46.

53 Lewontin, R.C. - Levins, R., The Problem of Lysenkoism, in The Radicalization of Science, a cura di H. e S. Rose, Macmillan, London 1976.

54 Mackic, J.L., The Miracle of Theism, Clarendon Press, Oxford 1982.

55 Margulis, L., Symbiosis in Cell Evolution, W.H. Freeman, San Francisco 1981.

56 Maynard Smith, J., Current Controversies in Evolutionary Biology, in Dimensions of Darwinism, a cura di M. Grene, Cambridge University Press, Cambridge 1983, pp. 273-86.

57 Maynard Smith, J., The Problems of Biology, Oxford University Press, Oxford 1986 (trad. it. Le nuove frontiere della biologia, Laterza, Bari 1988).

58 Maynard Smith, J., et al., Developmental Constraints and Evolution, in «Quarterly Review of Biology», 60, 1985, pp. 265-87.

59 Mayr, E., Animal Species and Evolution, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1963 (trad. it. L'evoluzione delle specie animali, Einaudi, Torino 1970).

60 Mayr, E., Principles of Systematic Zoology, McGraw-Hill, New York 1969.

61 Mayr, E., The Growth of Biological Thought, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1982.

62 Monod, J., Il caso e la necessità, Mondadori, Milano 1993.

63 Montefiore, H., The Probability of God, scm Press, London 1985.

64 Morrison, P. - Morrison, P. - Eames, C. - Eames, R., Powers of Ten, Scientific American, New York 1982 (trad. it. Potenze di dieci, Zanichelli, Bologna 1986).

65 Nagel, T., What Is Like to Be a Bat?, in «Philosophical Review», ripubblicato in The Mind's I, a cura di D.R. Horstadter e D.C. Dennet, Harvester Press, Brighton 1974, pp. 391-403 (trad. it. Che effetto fa essere un pipistrello? in Questioni mortali, est, Milano 2001).

66 Nelkin, D., The Science Textbook Controversies, in «Scientific American», 234:4, 1976, pp. 33-39.

Bibliografia 429

67 Nelson, G. - Platnick, N.I., Systematics and Evolution, in Beyond Neo-Darwinism, a cura di M-W. Ho e P. Saunders, Academic Press, London 1984.

68 O'Donald, P., Sexual Selection by Female Choice, in Mate Choice, a cura di P.P.G. Bateson, Cambridge University Press, Cambridge 1983, pp. 53-66.

69 Orgel, L.E., The Origins of Life, Wiley, New York 1973.

70 Orgel, L.E., Selection in Vitro, in «Proceedings of the Royal Society of London», B:205, 1979, pp. 435-42.

71 Paley, W., Natural Theology, 2a ed., J. Vincent, Oxford 1828 (trad. it. Teologia naturale, Bourlie, Roma 1808).

72 Penney, D. - Foulds, L.R. - Hendy, M.D., Testing the Theory of Evolution by Comparing Phylogenetic Trees Constructed from Five Different Protein Sequences, in «Nature», 297, 1982, pp. 197-200.

73 Ridley, M., Coadaptation in the Inadequacy of Natural Selection, in «British Journal for the History of Science», 15, 1982, pp. 45-68.

74 Ridley, M., The Problems of Evolution, Oxford University Press, Oxford 1986 (trad. it. I problemi dell'evoluzione, Laterza, Bari 1989).

75 Ridley, M., Evolution and Classification: The Reformation of Cladism, Longman, London 1986.

- 76 Ruse, M., *Darwinism Defended*, Addison-Wesley, London 1982.
- 77 Sales, G. - Pye, D., *Ultrasonic Communication by Animals*, Chapman & Hall, 1974.
- 78 Simpson, G.G., *Splendid Isolation*, Yale University Press, New Haven, Conn., 1980.
- 79 Singer, P., *Animal Liberation*, Cape, London 1976 (trad. it. *Liberazione animale*, Mondadori, Milano 1991).
- 80 Smith, J.L.B., *Old Fourlegs: The Story of the Coelacanth*, Longmans, Green, London 1956.
- 81 Sneath, P.H.A. - Sokal, R.R., *Numerical Taxonomy*, W.H. Freeman, San Francisco 1973.
- 82 Spiegelman, S., *An in vitro Analysis of a Replicating Molecule*, in «*American Scientist*», 55, 1967, pp. 63-68.
- 83 Stebbins, G.L., *Darwin to dna, Molecules to Humanity*, W.H. Freeman, San Francisco 1982.
- 84 Thompson, S.P., *Calculus Made Easy*, Macmillan, London 1910 (trad. it. *Il calcolo infinitesimale: reso facile*, Luigi Avalle, Torino 1923).
- 85 Trivers, R.L., *Social Evolution*, Benjamin-Cummings, Menlo Park 1985.
- 86 Turner, J.R.G., «*The Hypothesis That Explains Mimetic Resemblance Explains Evolution*»: *The Gradualist-Saltationist Schism*, in *Dimeti 430 Bibliografia sions of Darwinism*, a cura di M. Grene, Cambridge University Press, Cambridge 1983, pp. 129-69.
- 87 Van Valen, L., *A New Evolutionary Law*, in *Evolutionary Theory*, I, 1973, pp. 1-30.
- 88 Watson, J.D., *Molecular Biology of the Gene*, Benjamin-Cummings, Menlo Park 1976 (trad. it. *Biologia molecolare del gene*, Zanichelli, Bologna 1989).
- 89 Williams, G.C., *Adaptation and Natural Selection*, Princeton University Press, New Jersey 1966.
- 90 Wilson, E.O., *The Insect Societies*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1971 (trad. it. *Le società degli insetti*, Einaudi, Torino 1976).
- 91 Wilson, E.O., *Biophilia*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1984 (trad. it. *Biofilia*, Mondadori, Milano 1985).
- 92 Young, J.Z., *The Life of Vertebrates*, Clarendon Press, Oxford 1950.

Indice analitico e rinvii bibliografici

Questo è un libro da leggere dalla prima all'ultima pagina, non un'opera di consultazione. Molte fra le voci comprese in quest'indice significheranno qualcosa solo per chi abbia già letto il libro e desideri ritrovare un passo particolare. In un libro come questo le note sono una distrazione irritante. Il seguente indice analitico, oltre a svolgere la funzione normalmente assegnata a un tale indice, intende perciò anche sostituire le note fornendo i rinvii alle fonti bibliografiche. I numeri fra parentesi si riferiscono ai libri e agli articoli numerati elencati nella Bibliografia. Gli altri numeri si riferiscono alle pagine del libro. Quando una parola compare in una serie di pagine consecutive, di norma si indica solo la prima, o la pagina in cui si trova una definizione. adattamento, 28,245, 384, (19, 89) ala, mezza sua utilità, 130, (9, 41) alberi genealogici, numeri astronomici negli, 367, (37) alberi nella foresta, corsa agli armamenti fra gli, 253 alite ostetrico, 390

Also sprach Zarathustra (poema sinfonico di R. Strauss), 93, 99 alta fedeltà e progresso, 297

altruismo, 359, (20, 52) ambulanza, effetto, 52 ameba, 165, 338 amnioti, 347, (92) amplificatore, analogia dell', 340

Anderson, D.M., 219, (2)

Andersson, M., 292, (3) angeli, ali degli, 412 animali estinti, ricostruzioni di, 111 annidamento, 344, 348 antenapedia, 313

Arca dell'Alleanza, 158

Archaeopteryx, 353 archivi, dna, 174

-, fedeltà degli, 176 argilla, 210, (13, 14) suo «potere», 215 argomento del disegno intelligente in natura, 21, 23, (71) argomento dell'incredulità personale, 65, (63)

Argyll, duca di, 337, (73) aringa, 134, 372 armamenti, corsa agli, 245, (21,23) ciclica, 291

-, fine per ragioni economiche della, 263 fra i sessi, 245, 254, (85) simmetrica e asimmetrica, 255

armi, 255
 Asdic, 44
 Asimov, I., 73, (5) associazione, squilibrio da, .' (50, 51)
 Atkins, P.W., 35, (8)
 Australopithecus, 309, <14
 432 Indice analitico e rinvii bibliografici barba verde, 283, (20, 21)
 Bateson, W., 406, (cit. in 22) batteri, 165, 185, 242
 Bennet, G., 66, (cit. in 63) best-seller, 300 biblioteca, analogia della, 344, 349 biomorfi, 87, 317, 415
 Birmingham, vescovo di, 64-69, 422, (63)
 Boeing 747, montaggio casuale di un, 25, 318, 337, (43) brachino bombardiere, 126, (28) brodo primordiale, 207, (69)
 Cairns-Smith, A.G., 208-31, (13, 14) calamari, 125-26, 372 calli, 398 camera oscura senza lente, 125 camera stenopeica, 124 cane, evoluzione del, 68, 89 caratteri acquisiti, ereditarietà dei, 387, 398-99, (22) castori, 191, (21) cataratta, 118 catastrofismo, 327 cavalli e loro equivalenti sudamericani, 150, 362, (78) celacanto, 334, (80) cervello, evoluzione del, 260, 295, 310, (46) cetacei, ecolocazione nei, 140-41, (77) chimica organica, 208 chimici, 202 cicale periodiche, 144-45, (21) dado, 348, 375 cladismo, 347, 371-75, (75) trasformato, 375, 377 classificazione, 343-81, (60, 75, 81) biologica, sua unicità, 347, 363 cladistica, 347, 371, (75) molecolare, 363, 368, (37, 72) non biologica, sua arbitrarietà, 346 numerica, 375, (81)
 «tradizionale», 371-72, (60) coadattamento, 233 codici digitali, 161 coincidenza, 223, 368 colore nei pipistrelli, ipotesi della sensazione di, 60 combinazione, lucchetto a, 25-26 compact disc, 161, 213 complessità come eterogeneità di forma, 24-25 come improbabilità statistica, 25 specificata in anticipo, 25-26 computer analogia del disco, 238
 -, battitura del testo di Shakespeare al, 76-77
 -, biomorfi creati col, 81 giochi, 96 gioco degli scacchi, 101 modello, 97 spiegazione del suo comportamento, 32-33 sottovalutato, 98, 221
 -, valore del, 111 condizioni meteorologiche come nemico, 245 consanguinei, selezione fra, 283, (20) continenti, deriva dei, 146, (39) convergenza evolutiva, 137, (92) nell'rna in provetta, 189, (27) cooperazione fra geni, 235, (21)
 Copernico, N., 342 corsa agli armamenti, vedi armamenti, corsa agli coscienza umana, 224, (64) costi e benefici, 48, 263
 Cott, H.B., 259, (16)
 433 Indice analitico e rinvii bibliografici Creatore, 35, 197, 422 creazione divina come forma estrema di saltazionismo, 337 creazionismo, 312, 327, 341, 380, 422, (10, 48, 66, 76) introdotto di contrabbando nell'evoluzione, 337, 422 cretino, abilità matematica del, 103, (84) cristallo, 210
 Cromwell, O., 310 cronometri, 307 cuculo, 68
 Darwin, C., 21, 407, (11, 18, 32) e l'argomento dell'incredulità personale, 65-66 e l'ereditarietà dei caratteri acquisiti, 387 e le lacune nella documentazione fossile, 310, 325 e gli organi complessi, 132 e i puntuzionisti, 305, (22) e i salti miracolosi, 337-38, (32, 73) e la selezione sessuale, 274 e la specie, 321 e la stasi, 330
 Darwin, E., 385 darwiniano, caricatura del, 412 darwinismo -, opposizione al, 340, (10, 48, 66, 76) sociale, 340 datazione dei fossili, vedi fossili dattilografia, analogia della, 176
 Dawkins, J.E., dispositivo di randomizzazione di, 76 dealione, unità di improbabilità, 225
 De Vries, H., 406 dc8 allungato, 318, (22) delfini, ecolocazione nei, vedi ecolocazione deriva dei continenti, 146, (39) dighe argilla, 215-16 castori, 192, (21) disegno intelligente in natura -, argomento del, 20-21, 23-24, (71) definito, 41 dispositivi radar per la determinazione della velocità delle auto, 54 dna (acido desossiribonucleico) analogia con i dischi per computer, 238 come rom, 167
 -, conservatorismo del, 175
 -, correzione di errori nel, 179, (1) egoista, 165, (20, 21) origine, 196, 220 tecnologia dell'informazione, 159-94, (1, 57, 88)

Dolio, L., legge di, 137
 Doppler, effetto, 52
 Dover, G., 417, (25)
 Doyle, Sir A.C., 160 duplicazione di geni, 237-38, (1, 88) echidna, 148, 153 ecolocazione, 50-63, (38, 77) comparata con la vista, 58-60 nei delfini, 140-41, (77) nei pipistrelli, 45 negli uccelli, 138-39 economia, 48
 Eigen, M., 189, (26, 27)
 Eldredge, N. e le specie come entità, 355, (30)
 -, teoria degli equilibri punteggiati di, 311-42, (29) elettrolocazione, 142
 434
 Indice analitico e rinvii bibliografici embriologia, 82, 84, 234, 392
 -, costrizioni all'evoluzione imposte dall', 415, (58) emoglobina, 73, 178, 369, (5)
 Encyclopaedia Britannica, 39, 165 epigenesi, 392 equilibrio, linea di, 288, (4, 50, 51) erba, 250
 eredità particellare, 161, (57)
 Escherichia coli, 185, (70, 88)
 Esodo, parabola dell', 303 esoni, 239, (1)
 Esopo, 264, (21) esplosione, analogia dell', 268 idrochinone, 127 eucarioti, 242, (1, 55) evoluzione convergente, 144 fra i mammiferi, 146-54, (92) costruttiva, 233 culturale, 296
 -, a salti, teoria della, vedi macromutazione -, a velocità variabile, teoria dell', 332
 -, a velocità costante, teoria dell', 325, 354
 Ezechiele, profeta, 182 fabbri (ereditarietà dei caratteri acquisiti), 388 fate (impossibilità di dimostrarne l'inesistenza), 390 fauna australiana, 146, (78) sudamericana, 146, (78) femmina, scelta sessuale da parte della, 274 fenotipo, 173, 218, (21, 57) esteso, 193, (21) fibrinopeptide, 177, 369, (1) fileticismo, 371 filosofia antica a sostegno di un'organizzazione gerarchica del mondo, 379 fiori
 -, evoluzione dei, 97 che imitano le api, 94, 97
 Fisher, Sir R.A., (31) e l'eredità particellare, 161 e l'evoluzione del sesso, 360 fondatore del neodarwinismo, 163-64, 407 e la necessità del gradualismo, 314 e la selezione sessuale sfrenata, 272-73 fisica -, leggi della, 29-30 semplicità, 18-19 forasiepe, vedi scricciolo Ford, E.B., 120, (33) forme intermedie nell'evoluzione, 350 formiche, 153-58, (90) a Panama, 157, 267 formichieri, 154 fortuna, misurazione della, 199 fossili -, datazione dei, 306 geni, 240 lacune nella loro successione, 310, (29)
 France, A., 310 frequenza portante, 51 fulmine (non colpisce l'autore), 222 funghi, coltivazione di, 155, (90)
 Galambos, R., 61, (38) gazzella, 248
 Genesi, 421, (7) geni vedi anche duplicazione di geni 435 Indice analitico e rinvii bibliografici attivati selettivamente nello sviluppo, 395 come ambiente l'uno per l'altro, 233, 244, (21) dei biomorfi studiati col computer, 84 carattere indiretto della loro azione, 191 cooperazione, 235, 265, 336, (21) loro potere, 182-83 per la scelta da parte delle femmine, 277, (50, 51) trasmissione orizzontale e verticale, 174 genotipi coadattati, 234 gerarchia, 345, 347 ghepardo, 248 giraffa, 388 globigerine, fango a, 160 globine, 241, (1) goccia di rugiada, analogia della, 181
 Goldschmidt, R., 119, 313, (33)
 Gondwana, 147, (39)
 Gould, S.J. cancella la teoria sintetica, 341, (35) e gli equilibri punteggiati o puntuati, 310-42, (36) sul gradualismo di Darwin, 330, (36) e gli insetti che imitano lo sterco, 120, (cit. in 41) e l'occhio al 5 per cento, 119, (cit. in 41)
 Il pollice del panda, 133, (34) citato, 370, 389 gradualismo, 109, 303, 309
 Grafen, A., 273, 291
 Grande Catena dell'Essere, 351
 Griffin, D.R., 44, 61, (38)
 Haldane, J.B.S., 339
 Hamilton, W.D. e i parassiti, 291, (40) e la selezione fra consanguinei, 283, (20)
 Hardy, G.H., 163, 225

Hennig, W., 371,378, (75) hi-fi, vedi alta fedeltà e progresso Hitching, F., 116, 127, (41)
 Ho, M.-W., 410, (41,42)
 Hoyle, Sir F., 64, 318, (43)
 Hume, D., 23, (54)
 Huntington, corea di, 408
 Huxley, J. e il dado, 375 e la forza locomotiva, 31 e la selezione sessuale, 275
 Hyracotherium, 309 idrochero, 348 idrochinone, 127 improbabilità, stima di, 226 incredulità
 personale, argomento della, 65 indirizzamento, memoria e geni, 167 informazione, tecnologia della,
 160 ingegneri, 41 ingegneria genetica, 111 ingredienti necessari per la vita, 182 insetti creati da un
 programma per computer, 93-94 come agenti di selezione, 97 perduti e ritrovati, 98-99 introni, 240,
 (1) iposolfito di sodio, cristalli di, 211, (14) isolamento riproduttivo, 324. (5'») istone, 175
 436 Indice analitico e rinvii bibliografici Jenkin F., 162 (cit. in 44)
 Jerison, H., 260, (cit. in 44)
 Johannsen, W., 406
 Kimura, M., 405, 417, (47) koala, 359
 Koestler, A., 64, 389 lacune nella documentazione fossile, 310, (29)
 Lamarck, J.-B., 385 lamarckismo, 88, 383, (22)
 Land, M., 125, (49)
 Lande, R., 273-91, (4, 50, 51)
 Latimeria, 334, (80)
 Laurasia, 147, (39)
 Leigh, E.G., 359-60, (52) linguaggio, evoluzione del, 298, 349, (15) lingue, loro propagazione da
 un'isola all'altra, 298, (15)
 Loch Ness, mostro di, 392 lucchetto a combinazione, 25-26 luce, generata da animali, 43 lupo, 151
 «lupo» marsupiale, 151, 362, (24)
 Lyell, Sir C., 338
 Lysenko, T.D., 389, (53) macchina come essere vivente onorario, 17-18 macromutazione, 312, 327,
 331
 -, creazione come, 337 mammiferi, vedi evoluzione convergente Margulis, L., 242, (55) marsupiali,
 148, (92)
 Maynard Smith, J., 117
 Mayr, E. critico della genetica matematica, 117 poco gentile nei confronti dei fisici, 162, (61)
 speciazione, 324, 329, 336, (59) melanina, 386-87 memi, 220-21, (20)
 Mendel, G., 161, 406 metabolismo, 154, 262
 Methinks it is like a weasel, 76 microscopio, analogia col (Fisher), 314, (31) mimetismo, 119, (33,
 86) miracoli, 195, 222, 424 missili, 255 mitocondri, 242 moda, 296 modelli computerizzati, 97
 Montefiore, H., 64-69, (63)
 Morgan, T.H., 406
 Morris, D., 87 musica pop, 299 mutageni, agenti, 408 mutazioni, 184, (57)
 -, casualità, suo significato nelle, 408 macromutazioni, 312 nel modello dei biomorfi, 85 nel
 modello di Amleto, 76-77
 -, pressione delle, 409
 -, tasso delle, 177 mutazionismo, 406
 Myotis (pipistrello), 47
 Myrmecobius, 153
 Myrmecophaga, 153
 Nagel, T., 58, (65) nautilo, 124-26, (49)
 Nelson, G., 380, (67) nemici, 246-47 neodarwinismo, 164, 323 neutralismo, 364, 404, 417, (47, 74)
 Nobel, premio, 310
 Noè, 327
 437 Indice analitico e rinvii bibliografici
 Nuovo Testamento, 166 nuvole, 74-75, 80-81 occhio difetto rivelatore, 136

-, evoluzione graduale dell', 113, 317
 -, illustrazione schematica dell', 37 interconnessione delle sue parti, 118, 384-85, (41) suo «progetto», 38, (71) nella teoria di Dover, 419
 -, uso e disuso dell', 402, (22)
 O'Donald, P., 291, (68) optimum utilitario, 280 orecchio -, origine dell', 132 ossicini, 50 padiglione auricolare, 56
 Orgel, L., 188, (26, 69, 70) origine della vita, 181-82, 195-231, (13, 14, 17, 26, 27, 69) orme umane falsificate negli strati dei dinosauri, 306, 390, (76) orologio molecolare, 332, 365, (37) di Paley, 21, (71) orso polare, 65-66, (63) paleontologia, 305, (29)
 Paley, W., 21, 36, 41, 63-64, (71) parassiti ed evoluzione sessuale, 291, (40) parsimonia, 366 pavone, 272 pesci elettrici, 141 piatti, 133 pipistrelli, 42-64, (38, 77) vedi anche ecolocazione -, accoppiamento dei, 60
 -, ali degli angeli e ali dei, 412 colore, ipotesi della sensazione di, 60
 -, disturbo dei propri segnali da parte di altri, 56-57 diversità, 44
 Doppler, sensibilità all'effetto, 54
 -, esperienza soggettiva dei, 58 grida modulate in frequenza, 52 muscoli delle orecchie, 50
 -, problemi dei, 47-48, 51, 56, (19, 77)
 Platnick, N., 380, (67) polmone, mezzo sua utilità, 127, (41) polpo, 126, 138
 Popper, Sir K., 64 porcospini, 362
 Potter, S., 98 preformazionismo, 392-93, (57) procarioti, 242, (55, 88) progetto, teoria embriologica del, 393 progresso, 245, 249 protoplasma, 160 provetta, evoluzione in, 189, (27, 70) vedi anche rna puntuzionismo, 303-42, (29, 56, 74)
 -, concetto di specie nel, QE (quoziente di ciuci.ili//.i/i" ne), 260, (46) radar, dispositivo di commuta/in ne, 50 radar chirj) (o radar a modulazione di frequenza), 51 radio, comunicazioni extraterrestri, 230, (6)
 438 Indice analitico e rinvii bibliografici ragnatela, 66-67
 Rattray-Taylor, G., 64
 Regina Rossa, 252, (87)
 -, effetto, 252, (87) replicatore, 183, (20, 21) retina, 136 retroazione, 268 ricetta, teoria embriologica della, 394 ricorsione, 82, 173, (12)
 Ridley, M., 379, 381, (75) riduzionismo gerarchico, 33
 Rna (acido ribonucleico), 165
 -, evoluzione in provetta dell', 187, (70) rom (Read Only Memory, memoria a sola lettura), 166
 -, dna come, 167 rospo ostetrico, 390
 Rousettus (rossetta), 45, 51, 139, (77) salice, pioggia di dna dal, 159 saltazionismo, 312, 327, 331-32
 -, creazione divina come forma estrema di, 337-38
 Saunders, P., 410, (42) cit., 410, (41) scacchi, 101 scale di tempo, 226, (91) scelta, discrepanza di, 286 scimmie dattilografe, 76, 198-99 scimpanzè, 168, 353 scricciolo, 294 selezione artificiale, 89, 335 fra consanguinei, 283, (20) cumulativa, 74 naturale, 93 a passi singoli e cumulativa, 74, 197, 423 sessuale, 273-75, 290, (4, 31, 50, 51) per specie, 356 serpenti -, numero di vertebre dei, 319-20
 -, origine del veleno dei, 132 sesso -, enigma del, 360, (31, 85) ruoli, 276-77, (85)
 Shakespeare, W., 75, 98
 Shaw, G.B., 389 silicio, 208 simulazione, 59, 95 sistema solare, 72
 Smilodon (tigre dalle zanne a sciabola), 152
 Snow, C.P., 137 sonar, 42-63, (38, 77) spazio matematico, 101, 110, 420-21 speciazione, 321, 324, 329-30, 332, 335, (59, 74) specie in Darwin, 321 come entità, 355, (30, 56, 74)
 -, sciovinismo di, 163, 353, (79)
 -, selezione per, 356, (21) spettro di improbabilità, 223 spiaggia ghiaiosa, analogia della, 71 spiegazione, 31-34
 Spiegelman, S., 187, 189, (82) squilibrio da associazione, 279, (50, 51) stasi, 304, 328-30, 333, 336 statua "miracolosa", 222

Stebbins, G.L., 328, (83) stranezza, filtro di, 57 successione ecologica, 358 sviluppo, 84, 234, 393, (57)
 Tadarida (pipistrello), 50
 Tasmania, 151
 Indice analitico e rinvii bibliografia I ' tassonomia, 343 vedi anche classificazione esagerazione della sua importanza, 380 numerica, 375, (81)
 -, scuole di, 370 tendenze, 296 termiti, 154, (90) termodinamica, seconda legge della, 137
 termostato, analogia del, 288 tettonica a zolle (o a placche), 146, (39)
 Thompson, S.P., 103, (84)
 Thylacinus (tilacino o «lupo» marsupiale), 151, 362, (24)
 Thylacosmilus («tigre dalle zanne a sciabola» marsupiale), 152, (78) toporagni, speciazione dei, 322
 torta, analogia con lo sviluppo, 396 trasporti, progressi nei, 296 triangolo, trucco del, 103 uccelli, ecolocazione negli, vedi ecolocazione ultrasuoni, 45, (77) uso e disuso, 386, 402
 Van Valen, L., 252, (87)
 Vavilov, N.I., 390 vedova dalla coda lunga, 275, 292.
 (3) vie biochimiche, 235 virus, 185-86 visione facciale, 43, (38)
 -, imperfezioni della, 117 vita ciclo vitale nell'argilla, 215-16
 -, origine della, 195-231, (13, 14, 17, 26, 27, 69) nell'universo, 182, 199, 200, 229, (17)
 Watt, regolatore a sfere o regolatore a pendolo a braccio oscillante di, 268
 Wegener, A., 146, (39)
 Weinberg, W., 163
 Williams, G.C., 358, (89)
 Wilson, E.O., 156, (90)